

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA / INFORMÁTICA
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

JOHN THEO SIERPINSKI DE SOUZA
LUÍS GUILHERME BERGAMINI MENDES
RENATO GIRARDI GASOTO

DESENVOLVIMENTO DE THEREMIN FOCADO NO ESTUDO DE SENSORES

TRABALHO APRESENTADO À
DISCIPLINA DE OFICINA DE INTEGRAÇÃO 2

CURITIBA

2009

JOHN THEO SIERPINSKI DE SOUZA
LUÍS GUILHERME BERGAMINI MENDES
RENATO GIRARDI GASOTO

DESENVOLVIMENTO DE THEREMIN FOCADO NO ESTUDO DE SENSORES

Este trabalho tem como objetivo a construção do instrumento musical conhecido como theremin, com propósito de estudo do tema de sensores proposto pela disciplina de Oficina de Integração 2.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Alexandre de Faria

CURITIBA

2009

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
2	Contexto Histórico	3
2.1	Biografia de Lev Termen	3
2.2	O mundo e a eletrônica	8
2.3	Evolução histórica	9
2.4	Variações do theremin	10
2.4.1	Rythmicon	10
2.4.2	Terpistone	11
2.4.3	Theremin Cello	11
2.5	Revisão do estado da arte	12
3	Theremin Analógico	16
4	Theremin Digital	17
4.1	Controle de Frequência e Volume	17
4.2	Gerador de onda	21
4.3	Amplificador de Áudio	23
5	Montagem	24
6	Conclusão	32
	Referências	33

1 Introdução

Na década de 1920, utilizando-se de toda a evolução da eletrônica até então, o russo Lev Termen desenvolve um aparelho capaz de variar a frequência de um som ao alterar-se a distância entre uma antena e a mão do operador. Nasce dessa forma o instrumento musical que posteriormente seria conhecido como theremin, capaz de produzir sons sem qualquer contato físico. Nele, existem duas antenas: uma para controle de frequência (quanto mais próxima a mão do instrumentista, maior a frequência), e outra para controle de volume/amplitude (quanto mais próxima a mão do músico, menor o volume).

Originalmente, o theremin era composto por um circuito analógico e valvulado. Com o desenvolvimento da eletrônica, o circuito tornou-se diferente. Em ambos, o princípio de funcionamento é o mesmo, de acordo com a figura 1.

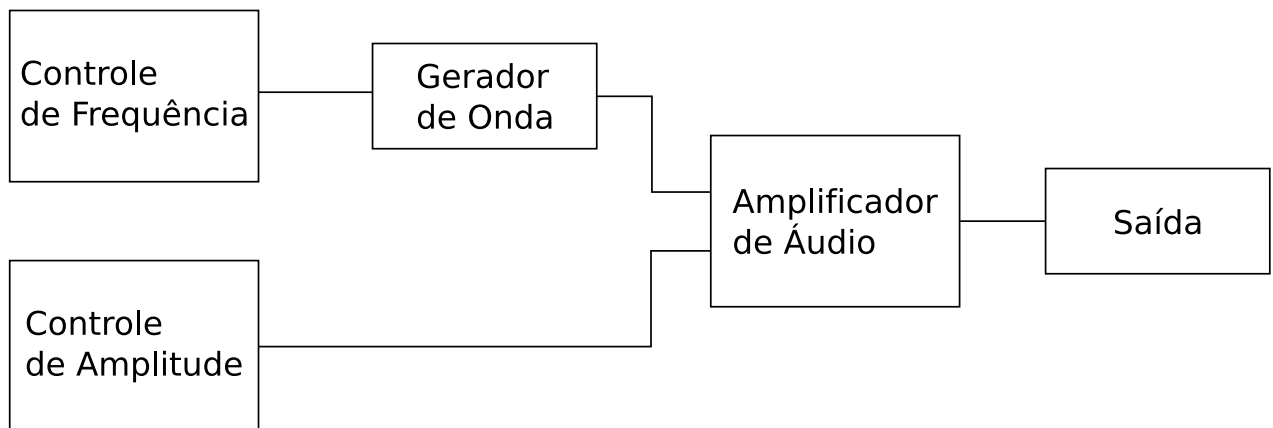


Figura 1: Diagrama de blocos do theremin.

O controle de frequência irá gerar uma onda base, de frequência fixa, e outra cuja frequência varia conforme a distância da mão à antena. Tais ondas são somadas (efeito Heteródino), e a resultante é direcionada a um amplificador de áudio. O controle de volume tem efeito similar, porém faz uso de elementos inversores em seu funcionamento (o volume é inversamente proporcional à distância da mão à antena). A resultante também é inserida no amplificador de áudio, que fará o processamento e fornecerá o som final, em uma saída de áudio.

1.1 Objetivos

Como objetivo geral deste projeto, tem-se o estudo das etapas envolvidas e a construção do theremin digital. Basicamente, serão seguidas as etapas:

- Estudo histórico do theremin e seu criador;
- Análise do diagrama esquemático do circuito;
- Busca pelos componentes necessários;
- Desenho e construção de uma placa de circuito impresso para comportar o circuito;
- Montagem da placa, antenas e fonte de alimentação em um gabinete adequado;
- Testes práticos e calibragem do aparelho.

Além da música, também serão discutidas outras aplicações do princípio de funcionamento do theremin.

2 Contexto Histórico

2.1 Biografia de Lev Termen

Lev Termen, mais tarde conhecido como Leon Theremin, nasceu em 1896 na cidade de São Petersburgo, da atual Rússia. Desde sua infância despertara interesse por ciência, em especial por eletricidade, área na qual aos 7 anos começou a dedicar atenção. Aos 13 realizava experimentos em altas frequências, como por exemplo utilizar um antena com alta tensão e produzir um som de alta frequência. Também interessou-se por música, estudando piano e cello, mas o aprendizado desses instrumentos o frustrou pela forma de como usar o arco e apertar os dedos para a produção do som (THEREMIN, 1983).

Aos 17 anos, ao fim do colegial, junto com seu primo Kyrill Fjodorowitsch Nesturch, assiste a dissertação de defesa de Abram Fjodorowitsch Ioffe, físico soviético, que lhe é apresentado mais tarde pelo seu primo. Ioffe lhe apresentou temas como efeito fotoelétrico e campo magnético em raios catódicos, que fizeram com que Leon aumentasse a abrangência de suas pesquisas (THEREMIN, 1970). L. Theremin já havia produzido, nesse último ano do colegial, uma Bobina de Tesla e havia observado um forte brilho relacionado com suas tentativas de ionizar o ar, e queria investigar melhor os efeitos de tal fenômeno utilizando os recursos da universidade. Em uma oportuna reunião com Ioffe, foi recomendado para Karl Karlowirsh Baumgart, encarregado dos equipamentos do laboratório de física, que reservou uma sala com equipamentos para os experimentos de L. Theremin. Passaria a investigar os métodos de criação de gás fluorescente sobre diferentes aspectos e observar os espectros de luz, como havia sugerido Ioffe (THEREMIN, 1970).

Mais tarde em 1916, no segundo ano da faculdade, inicia o serviço militar. O chefe do Departamento de Física e Astronomia lhe recomenda ir ao Nikolajewskoje Military Institute em Petrogrado, onde, por conselho até mesmo de Ioffe, seria um bom lugar pra adquirir experiência militar que poderia ser útil para aplicações científicas, visto que a guerra (Guerra Civil Russa) não duraria muito tempo e portanto não despenderia muito tempo com tal serviço (THEREMIN, 1970). Assim Leon vai para o instituto e rapidamente evolui através da escola militar de eletrônica, alcançando o diploma militar de rádio-engenheiro. Cerca de três anos e meio depois havia construído um rádio Saratov capaz de ligar a área de Volga com Moscou (cerca de 5km de distância). Sendo assim, logo

tornou-se vice-líder de rádio em Moscou, terminando como líder de rádio em Tsarskoye Selo (THEREMIN, 1970).

Em 1920, após ter recebido uma ligação de Ioffe, L.Theremin vai trabalhar com oscilações elétricas de alta frequência na nova divisão de Física e Tecnologia fundada por aquele em Leningrado. Esse é um período de grande avanço para Leon, que produz uma série de outros experimentos como um oscilador de alta frequência para medir a constante de gases com alta precisão. Ao ver tal resultado, Ioffe requisitou que Leon buscasse outras aplicações para o experimento (THEREMIN, 1970). Uma dessas aplicações foi em um sensor de presença que tinha uma área de atuação de cerca de 5 metros e sensível à variações de 1mm (THEREMIN, 1983). Outra foi adicionar um gerador de áudio no equipamento e perceber que, ao manipular sua mão nas proximidades, a frequência ouvida variava (THEREMIN, 1970). Em outubro do mesmo ano, com uma apresentação a Ioffe e outros professores, L.Theremin mostra as potencialidades de um novo "instrumento musical". Ao manipular as mãos próximas ao instrumento, busca notas musicais e tenta assim reproduzir "Swans"(Camille Saint-Saens) lembrando-se do tempo em que estudava cello, e percebendo o quão diferente era a interação entre manipulador e produtor de som, no caso instrumentista e instrumento. Nessa versão do instrumento o volume era controlado por um pedal aclopado. Em novembro, L.Theremin faz sua primeira apresentação pública em conferência eletrônica em Moscou. Nesta, a surpresa e o interesse são grandes por quem assistia um homem tocar música manipulando suas mão no ar. Nesta versão do instrumento o volume já era controlado por outra antena na horizontal. O instrumento foi nomeado pelo seu criador como Etherphone, mas ficou conhecido por Termenvox (voz do Termen) na Alemanha e por Theremin nos Estados Unidos (GLINSKY, 2000). Vladimir Il'yich Lenin, na época líder de Estado, foi um dos que prestigiou o invento na conferência, e com interesse em se familiarizar pelo aparato, convidou o inventor para comparecer no gabinete, pois nessa época a União Soviética estava interessada em coisas novas, em particular nas aplicações para a eletricidade em diversas áreas como: agricultura, transporte, comunicação. Quando L.Theremin foi ao gabinete, Lenin ainda não estava no momento. Uma secretária de nome Fotiva, formada em piano no mesmo conservatório que Leon, sugeriu que trouxessem um pequeno piano para a sala do chefe de estado, para que assim ela pudesse acompanhá-lo na música que fosse tocar. Sendo assim, quando Lenin chegou ao recinto, Theremin apresentou o instrumento, dissertou sobre o seu funcionamento e

logo depois interpretou "Skylark"(Glinka), uma peça (musical) que Lenin gostava. Após a interpretação todos aplaudiram e o chefe de estado tentou tocar a mesma música, na qual foi auxiliado no início, mas depois conseguiu concluir sozinho. A partir desse encontro, os caminhos para L.Theremin abriram-se de forma grandiosa, ao passo que Lenin deu "passe-livre" a Leon e dizendo que caso precisasse de alguma ajuda, que recorresse a ele.

Em 1921, Termen pede a patente pelo seu invento, a qual recebe em 1924. Desta época até 1927 foca-se também na transmissão televisiva ou também chamada de televisão sem fio conseguindo mostrar movimento em uma imagem usando 64 linhas intercaladas usando a técnica por ele inventada: o *Interlace*, que é uma técnica de aperfeiçoamento de imagens de um sinal de vídeo. Nesse meio tempo, em Maio de 1924, Lev casa-se com uma jovem de 20 anos de nome Katia Paviovna Constantinova e vão morar em um apartamento dos pais dele (GLINSKY, 2000).

Uma longa turnê para demonstrar seu invento na Europa é iniciada em 1927. Cidades como Londres, Paris e outras da Alemanha, estavam no trajeto e que foram de muito proveito para a propagação das idéias envolvidas no invento, bem como reconhecimento. Mas foi em dezembro de 1927, quando chegou no Estados Unidos, que L.Theremin encontrou seu caminho onde pode tocar o theremin (agora conhecido por esse nome ao invés de termenvox) juntamente com a New York Philharmonic(Orquestra Filarmônica de Nova Iorque) (GLINSKY, 2000) e conceder os direitos de produção em maior escala do seu invento à RCA – Radio Corporation of America (Radio Corporação da América) (U.S. Patent 1.661.058).

Os avanços não paravam. Mais e mais pessoas se interessavam pelo novo e único instrumento, e como tocá-lo (musicalmente) mesmo ironicamente sem tocá-lo (fisicamente). Era 1930 e L.Theremin tinha uma grande residência em Nova Iorque, onde havia sitiado seu laboratório. Muitas pessoas visitavam-lhe frequentemente para conferir o invento ou até mesmo para aprender sobre ele, tanto que nesse ano apresentaram-se 10 theremistas (músicos que tem o theremin como instrumento musical) no palco do Carnegie Hall e 2 anos mais tarde L.Theremin conduziu a primeira orquestra eletrônica. Instrumentos como o theremin, o "fingerboard"theremin (theremin trasteado) e o Rhytmicon – invento de Leon, mas comissionado por Henry Dixon Cowell, músico e teórico americano, era espécie de instrumento musical de percussão elétrico – também foram apresentados (THERE-

MIN, 1970). Pouco tempo depois Leon se divorcia, pois sua esposa havia entrado para um instituto de medicina um pouco distante de Nova Iorque, logo viam-se apenas raríssimas vezes por semana. Também por ela ter feito amizade com alguns alemães e também se apaixonado por um, o casamento veio a ruir, e surge uma falsa acusação de que Theremin era judeu. Muitos perguntaram a ele sobre sua esposa, mas na maioria das vezes desconversava, mesmo mantendo contato com ela (MATTIS, 1989).

Muitas pessoas frequentavam a casa de Leon: cientistas, compositores como Joseph Schillinger, teóricos musicais e até mesmos físicos como Albert Einstein, que na época despertara interesse em relacionar música e figuras geométricas bem como as cores para elas. Einstein queria combinar cores e formas em pinturas e para isso perguntou se era possível ele ter um laboratório para poder estudar esses fenômenos, assim Lev deu-lhe um estúdio, não muito grande, em sua própria casa e encontrou também uma assistente para aquele, que era uma empregada deste e também pintora. Logo a pequena sala não era mais suficiente e Einstein foi pedindo e recebendo mais espaço. L. Theremin o via com frequência mas conversavam um pouco, segundo este, não tendo muito em comum pelo fato de Einstein ser um físico e teórico e ele um inventor (MATTIS, 1989).

Mais tarde veio a surgir o Terpistone, que foi uma espécie de *theremin* destinado aos dançarinos. O *theremin* foi reestruturado para poder captar de boa forma os movimentos do dançarino, sendo que, se instalado em um palco, ao se aproximar da frente do palco o volume do som produzido aumentaria e ao dirigir-se ao fundo o volume diminuiria. Ao fazer movimentos para cima, a frequência aumentaria (nota mais alta, aguda) e ao fazer movimentos para baixo, a frequência diminuiria (nota mais baixa, grave) (THEREMIN, 1970). Com esse novo instrumento construído, muitos dançarinos começaram a frequentar a casa de Leon para ter aulas de como operar o instrumento. Dentre essas pessoas, uma dançarina negra, Lavinia Willians, com a qual L. Theremin fez uma grande amizade e mais tarde veio a casar, com a permissão do consulado, mesmo isso causando certa estranheza em seu círculo de amizades. Mas, como seu último casamento, esse veio a terminar seis anos mais tarde, pois ela casou-se com outro homem (MATTIS, 1989).

Abruptamente, em 1938, L. Theremin retorna para a União Soviética. Na época a razão do retorno não estava clara. Alguns diziam que ele estava adoecendo, outros que

ele havia sido raptado por oficiais soviéticos, mas a verdade, revelada anos mais tarde, era que estava passando por dificuldades financeiras nos Estados Unidos (GLINSKY, 2000). Pouco tempo depois de ter voltado ele foi aprisionado em Butyrka e mais tarde enviado para trabalhar nas minas de ouro de Kolyma. Surgiram rumores de que ele havia sido executado, mas na verdade ele foi enviado para trabalhar na Sharashka (laboratório de pesquisa e desenvolvimento soviético) (MATTIS, 1989). Durante o tempo em que esteve em Sharashka, L. Theremin ficou como encarregado dos outros trabalhadores e produziu outros inventos que serviram de grande proveito para KGB (Komitet Gosudarstvenno Bezopasnosti – Comité de Segurança do Estado). Um dos inventos foi o sistema de escuta Buran, que foi o precursor do atual microfone laser. Este sistema funciona com base em um feixe de infravermelho de baixa potência que a partir de uma distância é capaz de detectar vibrações sonoras em janelas. O invento foi usado para espionar as embaixadas dos Estados Unidos, Inglaterra e França em Moscou e rendeu a Leon o prêmio Stalin pelo avanço na tecnologia em espionagem (GLINSKY, 2000). Outro invento foi o batizado de "The Thing" (A Coisa), que era um dispositivo de escuta na forma de um grande Selo dos Estados Unidos, talhado na madeira, que serviu como um presente na forma de "gesto de amizade de aliado" pela II Guerra Mundial, para a embaixada americana. "A Coisa" interceptou conversas confidenciais durante cerca de 7 anos da Guerra Fria, até que em 1952 foi descoberto acidentalmente (KENNAN, 1972).

Em 1947 L. Theremin casa-se novamente e tem duas meninas gêmeas, de nomes Lena e Natalia. Mesmo depois de ter sido dispensado pelo serviço secreto, Leon voluntariou-se para continuar trabalhando com a KGB até 1966 e depois trabalhou no Moscow Conservatory of Music (Conservatório de Música de Moscow) até que um visitante nova-iorquino o descobrisse e o vice-presidente do conservatório dissesse que as pessoas não precisavam de música eletrônica, pois a eletricidade era para matar traidores na cadeira elétrica. Assim, Leon foi despedido, seu laboratório foi fechado e seus instrumentos destruídos (MATTIS, 1989).

Depois de ter permanecido 51 anos na União Soviética e treinado muitos theremistas virtuosos, começa uma viagem, acompanhado de sua filha Natalia. Inicia na França em 1989, passando pelos Estados Unidos em 1991, onde reencontrou sua antiga pupila Clara Rockmore. Filmou com Steven M. Martin e faz uma demonstração no Royal Conservatory of The Hague (Conservatório Real de Hague) (THEREMIN, 1970). De volta a Moscou,

em 1993, aos 97 anos vem a falecer.

2.2 O mundo e a eletrônica

Até a invenção do theremin na década de 1920, estudos em elétrica e eletrônica estavam intimamente ligados à comunicação. Segundo Hazeu (1971), o início do século XIX foi marcado por tentativas de transmissão de mensagens por meio de corrente elétrica.

No ano de 1837, o cientista americano Morse desenvolveu um código, chamado de código Morse, e um equipamento (telégrafo) capaz de transmitir mensagens nesse código através de longas distâncias. Posteriormente em 1877, Edison estudou a conversão de vibrações causadas por ondas sonoras em uma membrana em corrente elétrica, princípio que deu origem ao microfone. Pouco depois, Bell criou um equipamento que, utilizando o funcionamento do microfone, era capaz de transmitir a informação captada para um alto-falante situado em outra localização – inicialmente a curtas distâncias – invento denominado telefone. Circuitos oscilatórios estavam, ao mesmo tempo, em estudo pelos cientistas Von Helmholtz e Thomson (Lord Kelvin). Em 1867, o físico teórico Maxwell provou que circuitos desse tipo podiam gerar ondas eletromagnéticas capazes de se propagar no "éter", na velocidade da luz ($300.000km/s$). Foi apenas em 1887 que o físico alemão Hertz teve sucesso em produzir tais ondas. Com isso, ao final do século XIX, todos os elementos necessários para a invenção do rádio foram criados (HAZEU, 1971).

Os primeiros equipamentos de transmissão e recepção de sinais de rádio foram criados pelo italiano Marconi, que teve sucesso ao transmitir mensagens em código Morse por uma distância de duas milhas. Posteriormente o circuito foi melhorado com a inclusão de um elemento oscilador. Em 1897 é fundada a "The British Marconi Company", na Inglaterra, e também uma filial na América, surgindo assim meios financeiros para experimentos em maior escala. Em 1901 ocorre a primeira transmissão de telégrafo através do Oceano Atlântico. Inicialmente apenas navios de grande porte utilizavam tais sistemas de rádio, porém após o desastre do Titanic em 1912, que ficou sem comunicação com embarcações menores que estavam próximas, o uso tornou-se compulsório para todos. A partir daí surgem diversas aplicações para o rádio, como previsão do tempo, cotações de bolsa de valores, notícias, etc (HAZEU, 1971).

Outro importante marco na história da eletrônica até a invenção do theremin, além do rádio, foi a televisão. Experimentos com tubos de raios catódicos eram feitos desde 1897. Em 1928, Zworikin construiu um "iconoscópio", aparelho que emite feixes de elétrons em uma tela sensível à intensidade da corrente aplicada, fazendo com que existam luminosidades diferentes em cada ponto aplicado (HAZEU, 1971).

Segundo Ferro (1992), no mesmo período, o mundo passa por revoluções políticas e sociais. Em junho de 1914, com o assassinato de Francisco-Fernando, herdeiro do trono da Áustria-Hungria, tem início a Primeira Guerra Mundial. Nações européias tais como a Rússia, Alemanha, Itália, França, Áustria-Hungria e Inglaterra envolvem-se em um conflito de grandes proporções e duração, ao contrário da guerra breve que se imaginava. Ao final de 1914, milhões de combatentes ficaram surpreendidos por se encontrarem imobilizados, e num paradoxo de guerra, foram forçados a enterrar-se para sobrevivência. Essa guerra de trincheiras trouxe conseqüências tais como a Revolução Russa, com o surgimento da URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas), sob governo de Vladimir Lenin.

Marcante para a história global, na década de 1920 ocorreu uma grande crise econômica batizada por "Depressão de 1929". Teve início com a quebra da bolsa de valores em Wall Street e rapidamente espalhou-se pelo mundo todo gerando desemprego, falências e quedas nos mercados internos. Originou-se devido ao excesso da produção industrial, ao mesmo tempo em que os salários eram baixos e a concentração de renda era alta. Porém, com a URSS isolada do mundo capitalista, a crise de 29 teve pouco efeito sobre o país (PAZZINATO, 2005).

Com isso, cria-se um panorama do momento histórico em que surge o theremin.

2.3 Evolução histórica

O theremin, em sua gênese, foi um produto patrocinado pelo governo russo na área de pesquisa em sensores de proximidade e inventado, em 1920, por Lev Sergeivich Termen (Leon Theremin) sendo que sua primeira versão não tinha a antena de volume e este era controlado por um pedal aclopado ao instrumento. Lenin após ter presenciado uma apresentação do instrumento em uma conferência e depois de ter interagido com o próprio

instrumento em seu gabinete, comissionou a produção de 600 instrumentos para a distribuição na União Soviética e enviou L. Theremin para uma viagem ao redor do mundo para este demonstrar o último avanço tecnológico de instrumento eletrônico dos soviéticos (GLINSKY, 2000).

Depois de passar por diversas cidades e países, L. Theremin fixa-se no Estados Unidos, mais precisamente em Nova Iorque onde compra uma grande casa para abrigar seu laboratório, fazer adaptações no seu invento bem como criar variações - como o Terpstone, o Rythmicon e o Theremin Cello (Fingerboard Theremin) - e poder receber os entusiastas do seu invento (THEREMIN, 1983).

É nessa época que Leon consegue a patente do seu invento e garante os direitos de produção comercial à RCA - Radio Corporation of America (Radio Corporação da América), que começou a comercializar o instrumento logo após a Queda da Bolsa de Valores de 1929, mas que não foi um sucesso comercial (GLINSKY, 2000).

Durante um bom tempo houve uma onda de interesse pelo theremin, mas isto diminuiu após a Segunda Guerra Mundial quando começaram a surgir outros instrumentos musicais eletrônicos que era mais fáceis de serem tocados. Um seleto grupo de pessoas ainda mantinha seu interesse pelo theremin, como entusiastas eletroeletrônicos e pessoas que tinham o theremin como um hobby. Dentre essas pessoas estava Robert Moog que começou a construir theremins no colegial em 1950 e publicou diversos artigos sobre a montagem de um theremin e mais tarde kits de theremin que eram destinados para a montagem por parte de quem comprava (THEREMIN, 1970).

Atualmente existe uma gama de theremins no mercado sendo que os mais utilizados em escala profissional são os da marca Moog (do empresário Robert Moog). Os theremins Moogs são theremins digitais. Diferente do primeiro modelo que L. Theremin produziu, estes theremins utilizam circuitos transistorados ao invés de valvulados, mas o princípio do efeito heteródino é o mesmo (GLINSKY, 2000).

2.4 Variações do theremin

2.4.1 Rythmicon

O Rythmicon utiliza-se do mesmo princípio do theremin, o efeito Heteródino, e é uma espécie de bateria eletrônica onde em suas 17 teclas pode-se obter células ritmicas. Este instrumento foi comissionado por Henry Dixon Cowell, compositor americano, que o usou em sua obra (musical) de nome 'Rhythmicana' (1932) que mais tarde viera a ser rebatizado por 'Concerto for Rythmicon an Orchestra' e em outras obras (musicais) (HENLY, 1932).



Figura 2: (HENLY, 1932)

2.4.2 Terpistone

O Terpistone foi uma adaptação do theremin para dançarinos, onde o dançarino ao se dirigir à parte posterior da plataforma do instrumento, este produziria notas de volume mais alto e o oposto aconteceria se aquele se aproximasse desse. Ao fazer movimentos para cima o dançarino faria com o que o instrumento produzisse notas mais agudas (de frequência mais alta) o oposto aconteceria com movimentos para baixo. Muitos dançarinos frequentaram a casa de L. Theremin com o intuito de conhecer e poder experimentar a sensação de utilizar o Terpistone (THEREMIN.INFO, 2009a).

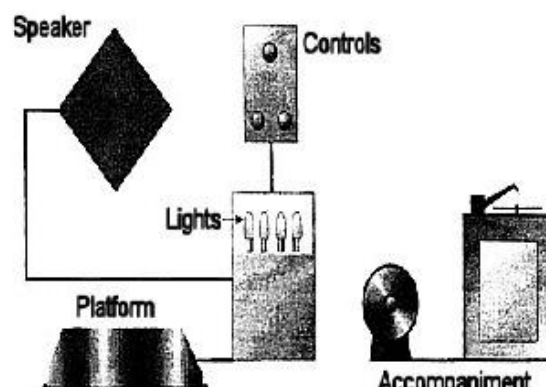


Figura 3: Diagrama do Theremin e exemplo de utilização (THEREMIN.INFO, 2009a).

2.4.3 Theremin Cello

Fabricado em 1930 pela empresa Termens Teletouch, o Theremin Cello foi uma outra adaptação do theremin feita por seu inventor pois esse era violocelista formado no conservatório de Moscow. No lugar de cordas, este instrumento tem um película preta e flexível e o som é produzido quando os dedos são deprimidos (abaixados) contra o braço do instrumento. O volume é controlado por uma alavanca e o trímbr por dois botões acoplados no corpo do instrumento (THEREMIN.INFO, 2009b).

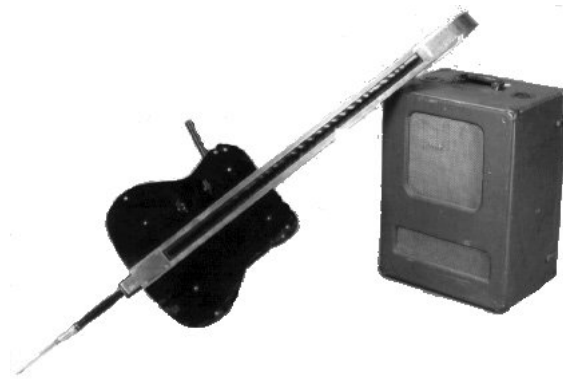


Figura 4: Theremin Cello (THEREMIN.INFO, 2009b).

2.5 Revisão do estado da arte

O primeiro theremin produzido em escala comercial, foi o theremin AR-1264(modelo) da RCA. Este é um theremin valvulado ao contrário dos hoje theremins transistorados. Alguns lotes usaram número de série e hoje tem-se arquivado os nomes e endereços dos donos dos respectivos theremins (THEREMIN-WORLD, 1996). Por ser algo novo e que causava certa curiosidade, a propaganda do produto investiu nesse ponto, misturando facilidade de tocar com um pouco fantasia (PAVEK, 2002).



Figura 5: RCA Theremin AR-1264 (RCA, 2009).

Com a distribuição de kits de montagem de theremin e divulgação de diagramas esquemáticos, cada vez mais intusiastas se motivaram a ter seu próprio theremin e algumas

empresas a produzir comercialmente (THEREMIN, 1983). A evolução da eletrônica e a criatividade de desenvolvedores fez com que o theremin fosse aplicado a uma gama diversa de áreas (BARILE, 2005b). O tamanho e funcionalidade foram adaptados, como é o exemplo do 'Junior Theremin Musical Electronic Kit' que é um kit para montagem de um theremin que apenas varia a frequência (BARILE, 2009).

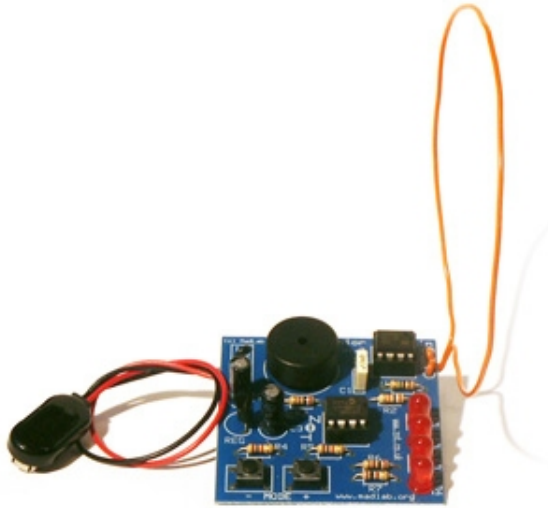


Figura 6: Apogee Kit - Junior Theremin Musical Electronic Kit (BARILE, 2009).

Modificando um pouco a forma de interagir com o instrumento, a Maestro(empresa produtora de theremin) contruiu o Maestro Theremin model TH-1 que no lugar de ter as duas antenas, tem duas placas metálicas (LUTHER, 2005).



Figura 7: Maestro Theremin (LUTHER, 2005).

A utilização das propriedades sensoriais do theremin também foram expandidas em pedais de efeito para guitarra, como é o caso do pedal 'Fuzz Probe' da marca ZVex, em

que o o efeito de 'Fuzz' é controlado pela distancia em que o pé se encontra do pedal (ZVEX, 2005).



Figura 8: ZVex - Fuzz Probe (ZVEX, 2005).

Enfeites para jardins e para casa também se utilizaram do conceito do theremin. A priorio um simples adorno, pode funcionar como um sensor de presença. Como exemplo tem-se o 'Matryomin ME02' da empresa Mandarin Electron que é um theremin que apenas varia a frequenciae tem a forma de uma boneca russa (BARILE, 2008).



Figura 9: Mandarin Electron - Matryomin ME02(BARILE, 2008).

O theremin profissional mais evoluído é o 'Etherwave Pro' produzido pela Moog que tem uma alta qualidade e fidelidade sonora com o modelo original (BARILE, 2005a).



Figura 10: Moog - Etherwave Pro (BARILE, 2005a).

3 Theremin Analógico

O theremin analógico funciona a partir da geração de duas ondas A e B de radiofrequência (SKELDON et al., 1998) com frequências similares e são combinadas de maneira que reproduza a onda com frequência igual à diferença entre as frequências de A e B , seguindo a seguinte expressão da soma de cossenos:

$$\sin \theta \sin \phi = \frac{\cos(\theta - \phi) - \cos(\theta + \phi)}{2} \quad (1)$$

Em que $\theta = 2\pi f_A$, e $\phi = 2\pi f_B$. A este fenomeno dá-se o nome de efeito Heteródino (GLINSKY, 2000).

Esta onda está pronta para ser o sinal de saída, restando fazer apenas o controle de amplitude. Utilizando outro sistema igual a este, passando o sinal por um filtro passa-baixo (IRWIN, 1999) obtém-se uma tensão DC, que é utilizada para controlar a válvula de amplificação do sinal de saída.

O diagrama esquemático de um theremin analógico da Moog (MOOG, 1954) pode ser visto na figura 11.

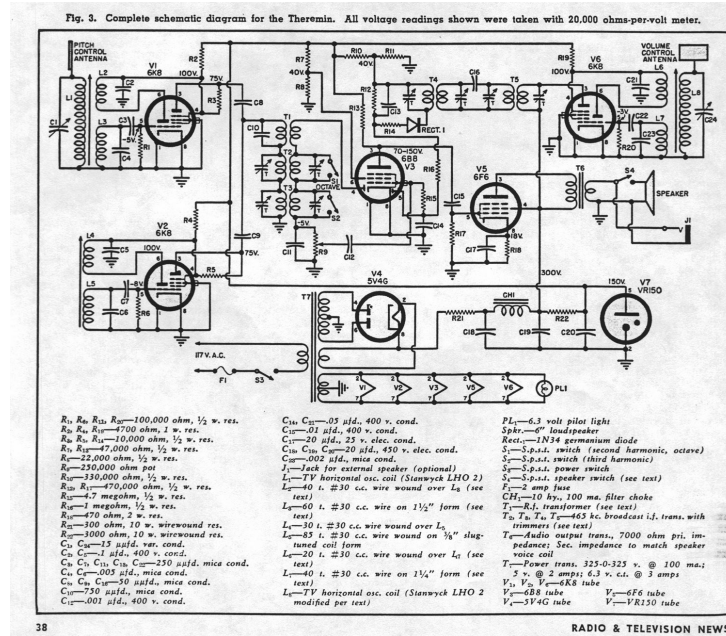


Figura 11: Diagrama do Moog theremin (MOOG, 1954).

4 Theremin Digital

4.1 Controle de Frequência e Volume

Assim como o theremin analógico, o digital é composto por uma antena para controle de volume e outra para determinar o tom – ou seja, altura da nota. Os circuitos para isso são similares, havendo uma diferenciação no controle de volume. Cada antena utiliza um sistema realimentado composto por um capacitor, um resistor e uma porta lógica Schmitt trigger (TOCCI; WIDMER; MOSS, 2007), ajustados da seguinte maneira:

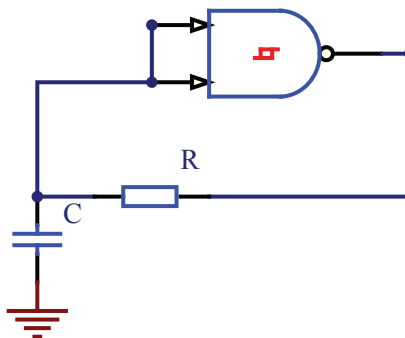


Figura 12: Circuito do Multivibrador astável.

Este circuito é denominado multivibrador astável (TOCCI; WIDMER; MOSS, 2007), e gera um trem de pulsos cuja frequência é (FAIRCHILD, 1999):

$$f = \frac{1}{RC \ln \frac{(V_T^+)(V_{CC}-V_T^-)}{(V_T^-)(V_{CC}-V_T^+)}} \quad (2)$$

Em que R e C são, respectivamente, os valores de resistência e capacitância associados ao multivibrador. V_T^+ é o valor de limiar de chaveamento positivo, especificado em (FAIRCHILD, 1999), V_T^- é o valor de limiar de chaveamento negativo, também especificado em (FAIRCHILD, 1999), e V_{CC} é a tensão de alimentação do circuito integrado. Deve-se notar que há uma frequência máxima a ser obtida devido ao período de transição e propagação LOW to HIGH e HIGH to LOW do componente utilizado, que no caso do 4093, possui, segundo Fairchild (1999), respectivamente tempo típico de 40 e 80 ns para $V_{CC} = 15V$, resultando em frequência máxima de 8,3MHz (inverso da soma do tempo de transição e propagação).

Para fazer o multivibrador astável é necessário o uso da porta Schmitt trigger, pois esta possui nível de histerese para troca de estado, possibilitando a carga e descarga do capacitor (TOCCI; WIDMER; MOSS, 2007).

Ao inserir uma antena no circuito da figura 12 temos o seguinte:

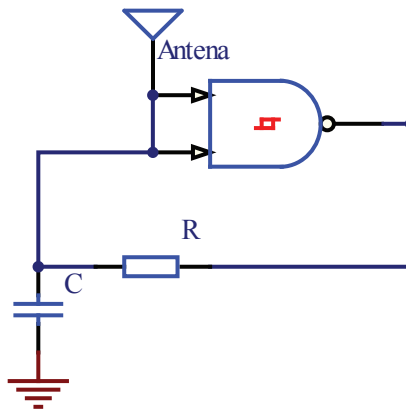


Figura 13: Circuito do Multivibrador astável com uma antena associada.

Esta antena estará em um dado potencial que é igual ao valor de carga do capacitor. Ao aproximarmos um objeto da antena, situado em outro potencial elétrico, separados por um dielétrico, no caso o ar, tem-se classificado o conjunto como um capacitor. No the-

remin, o instrumentista (manipulador do aparelho musical) usualmente estará no mesmo potencial elétrico da terra, e irá aproximar sua mão da antena. Este conjunto pode ser simplificado a um capacitor de placas paralelas, cuja fórmula de capacitância se dá por:

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \quad (3)$$

Em que:

- C : capacitância associada
- ε_0 : Permissividade do meio
- A : área de contato
- d : distância entre as placas

Como o instrumentista está no potencial GND (*Ground* – terra), o conjunto mão-antena terá uma capacitância C_A associada em paralelo com a capacitância do multivibrador astável, alterando desta forma a constante RC de oscilação do multivibrador, seguindo a formula:

$$f = \frac{1}{R(C + C_A) \ln \frac{(V_T^+)(V_{CC} - V_T^-)}{(V_T^-)(V_{CC} - V_T^+)}} \quad (4)$$

Desta maneira, a frequência de oscilação estará em função da proximidade da mão do instrumentista, de maneira que quanto mais próxima a mão, menor esta frequência. Este sinal, ao ser combinado utilizando a lógica XOR (*exclusive OR* – OU exclusivo) (TOCCI; WIDMER; MOSS, 2007) utilizando o circuito integrado 4070, (PHILIPS, 1995) com um sinal de referência com frequência constante, gerado por outro multivibrador astável, resultará em um sinal de batimento, mostrado na figura 15.

Ao tirar a média deste sinal com um filtro capacitivo, tem-se uma onda triangular. Quanto maior a diferença de frequência entre o sinal de referência e o sinal proveniente do multivibrador astável com a antena, maior será a frequência desta onda triangular. Esta onda é utilizada como entrada de uma porta NAND Schmitt trigger (TOCCI; WIDMER; MOSS, 2007), de modo que a resultante será uma onda quadrada de mesma frequência,

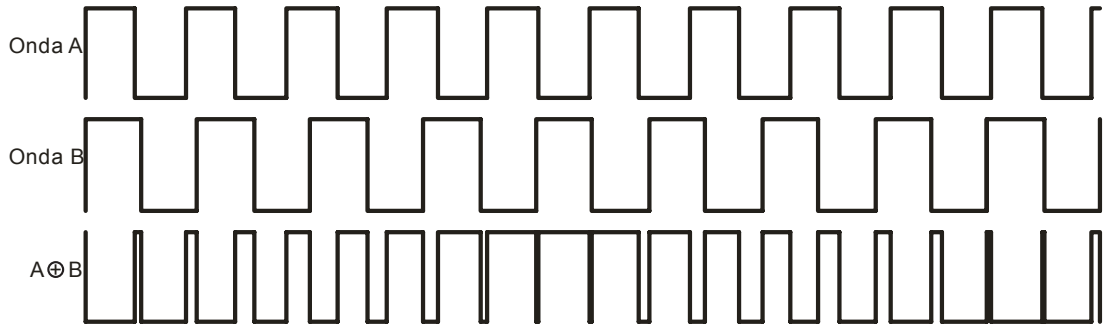


Figura 14: Exemplo da operação OU-exclusivo entre duas ondas de frequências próximas.

resultando desta maneira em uma reprodução do efeito heteródino (SKELDON et al., 1998) para circuito digital.

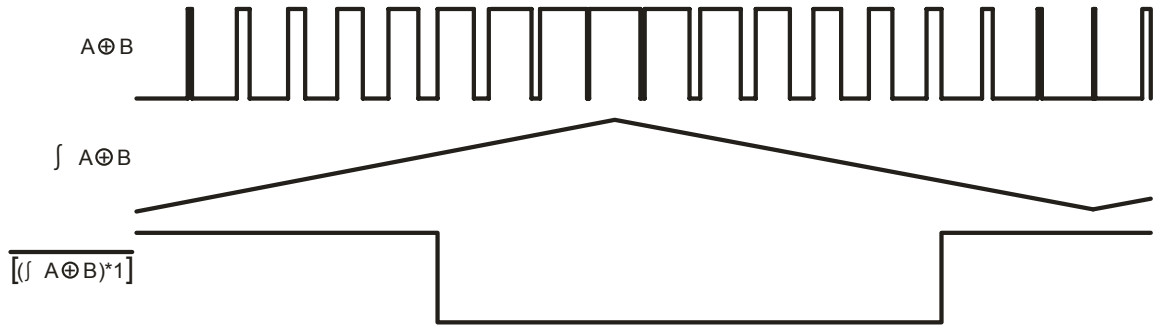


Figura 15: Média do sinal de batimento antes e após passar pela porta NAND.

Para que este sinal seja utilizado, ele é colocado como gatilho de um multivibrador monoestável (TOCCI; WIDMER; MOSS, 2007). O multivibrador monoestável utilizado foi o componente 4098, e foi configurado para que a cada disparo seja gerado um pulso de largura constante, determinada por (TEXASINSTRUMENTS, 2004):

$$T = \frac{R_x C_x}{2} \quad (5)$$

Em que R_x e C_x são, respectivamente, os valores da resistência e capacitância associados ao multivibrador monoestável.

Estes pulsos possuem largura constante, contudo o tempo de disparo entre um pulso e outro não é constante, e depende da frequência do sinal de gatilho. A esta variação dá-se o nome de modulação em frequência (TOCCI; WIDMER; MOSS, 2007). Ao filtrar o sinal resultante temos um sinal de tensão contínua, cujo valor varia de acordo com a

proximidade da mão do instrumentista à antena.

O circuito de montagem para controle de tom e volume até este ponto são idênticos, e terão o diagrama esquemático mostrado na figura 16. Todo o circuito é alimentado com uma tensão $VCC = 15V$ e $-VCC = -15V$.

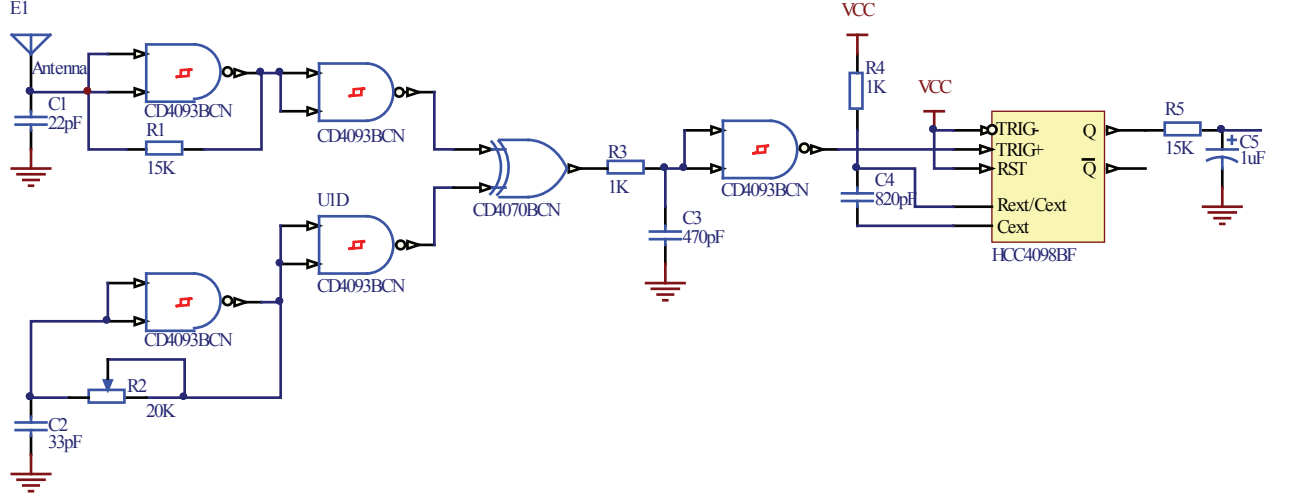


Figura 16: Diagrama do circuito de controle para as antenas.

Para o multivibrador astável da antena, foi utilizado um conjunto $R1 = 15k\Omega$ e $C1 = 22pF$, que ao colocar na fórmula 2 obtemos uma frequência base de oscilação $f = 2.89MHz$. Este valor não é exato pois a antena interfere na capacitância associada, mesmo sem haver a mão presente, resultando em uma oscilação base um pouco menor do que este valor.

O multivibrador astável de referência possui um resistor variável para permitir uma calibração da referência de acordo com a frequência base do oscilador da antena. Neste foi utilizado um conjunto $R2_{Max} = 20k\Omega$ e $C2 = 33pF$, resultando em frequências de oscilação a partir de $f = 1.31MHz$.

O conjunto $C3$ e $R3$ implementa um filtro passa-baixo (IRWIN, 1999), cuja frequência de corte se dá por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (6)$$

Resultando em $f_c = 0.339MHz$, fazendo com que desta forma esta seja a máxima frequência da onda triangular resultante.

Para determinar a largura do pulso gerado pelo multivibrador monoestável é utilizado o conjunto $R4$ e $C4$. Seguindo a fórmula 5 resulta em uma largura de pulso $T = 41\mu s$.

4.2 Gerador de onda

Para gerar o sinal audível foi utilizado um gerador de formas de ondas de precisão controlado por tensão ICL8038 (INTERSIL, 2001). Este gerador de formas de onda possui três formatos de onda de saída: quadrada, triangular e senoidal, sendo todas geradas ao mesmo tempo e possuem a mesma frequência, controlada diretamente pela tensão DC aplicada ao pino 8, a partir da tensão positiva de alimentação do componente. Para utilizar o ICL8038 foi montado o circuito descrito na figura 17.

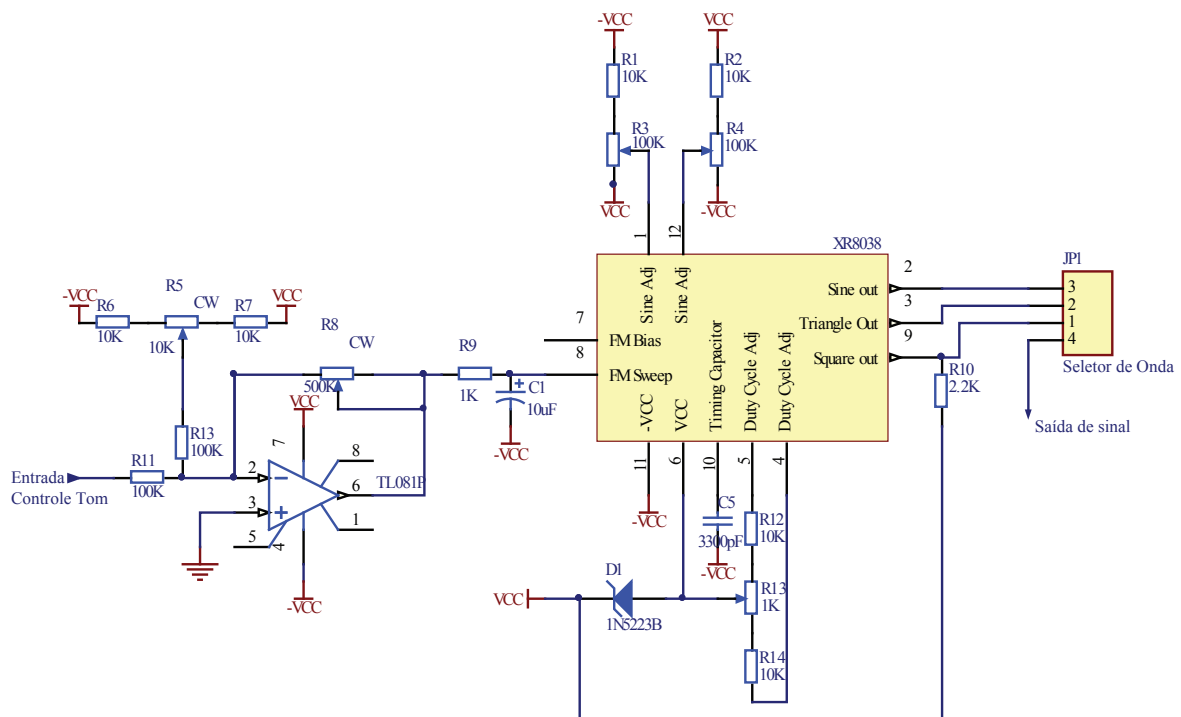


Figura 17: Diagrama do circuito de controle do ICL8038.

Como a tensão DC gerada pelo controle de tom aumenta conforme a mão aproxima da antena, e possui pequena variação, chegando a no máximo $5V$ é utilizado o amplificador JFET (MILLMAN; HALKIAS, 1981) TL081 (STMICROELECTRONICS, 1998) para intensificar essa variação e inverter a relação, de modo que ao aproximar a mão da antena uma diferença de potencial maior (em módulo) seja medida a partir de VCC. Para regular o nível de intensificação do sinal foi utilizado o potenciômetro $D8$, de $500k\Omega$ realimentação

do amplificador, que combinado com a resistência R_{11} resulta em um ganho de até 5 : 1. Para regular o offset deste sinal é utilizada a ponte de resistores R_5 , R_6 , e R_7 , onde o controle é feito ao variar o valor de R_5 . Os pinos 4 e 5 são utilizados para ajuste de Duty Factor (TOCCI; WIDMER; MOSS, 2007), possibilitando correção de distorção na onda de saída. O ajuste fino da fidelidade da onda senoidal é feito em um regulador nos pinos 1 e 12 através de potenciômetros. Para que haja grande quantidade de níveis de frequência, deve-se ajustar o sweep de modo que a tensão no pino 8 seja sutilmente maior que a tensão de alimentação do circuito (INTERSIL, 2001). Para que isto ocorra é colocado um diodo Zenner (MILLMAN; HALKIAS, 1981) de 2.4V inversamente polarizado entre VCC e o pino 6, fazendo com que a alimentação do 8038 seja menor que a tensão geral do circuito, obtendo assim uma resolução de frequências de 1000:1.

Para regular a tensão de saída do sinal é utilizada realimentação de VCC na saída da onda quadrada, resultando em tensão de saída da onda quadrada igual a VCC. Como as outras ondas são obtidas a partir de filtros da onda quadrada nestas não precisa ser regulada a tensão de saída, contudo esta será menor devido às perdas nos filtros, sendo que para $VCC = 15V$ a tensão RMS (IRWIN, 1999) de saída do sinal triangular será 12V e do sinal senoidal será 6V. A seleção do sinal resultante será feita através de uma chave seletora 3x1, conectada através de um cabo à placa, possibilitando que esta chave seja fixada em um painel.

4.3 Amplificador de Áudio

Para o sinal gerado pelo ICL8038 ter controle de amplitude foi utilizado um amplificador de áudio controlado por Tensão Ssm2018 (ANALOG-DEVICES, 1999), de modo que a tensão obtida ao aproximar a mão da antena de volume pelo controle de volume seja utilizada para limitar o volume de saída. O circuito para controle é mostrado na figura 18.

Da mesma maneira que no controle de tom, a tensão DC gerada pelo controle de volume possui pequena variação, desta forma sendo necessário passar por um amplificador TL081, que está configurado da mesma maneira. Como o desejado é que ao aproximar a mão da antena o volume de saída seja reduzido, este sinal deve ser invertido, portanto é utilizado outro TL081, mas com ganho de 1 : 1, fazendo com que ao aproximar a mão da

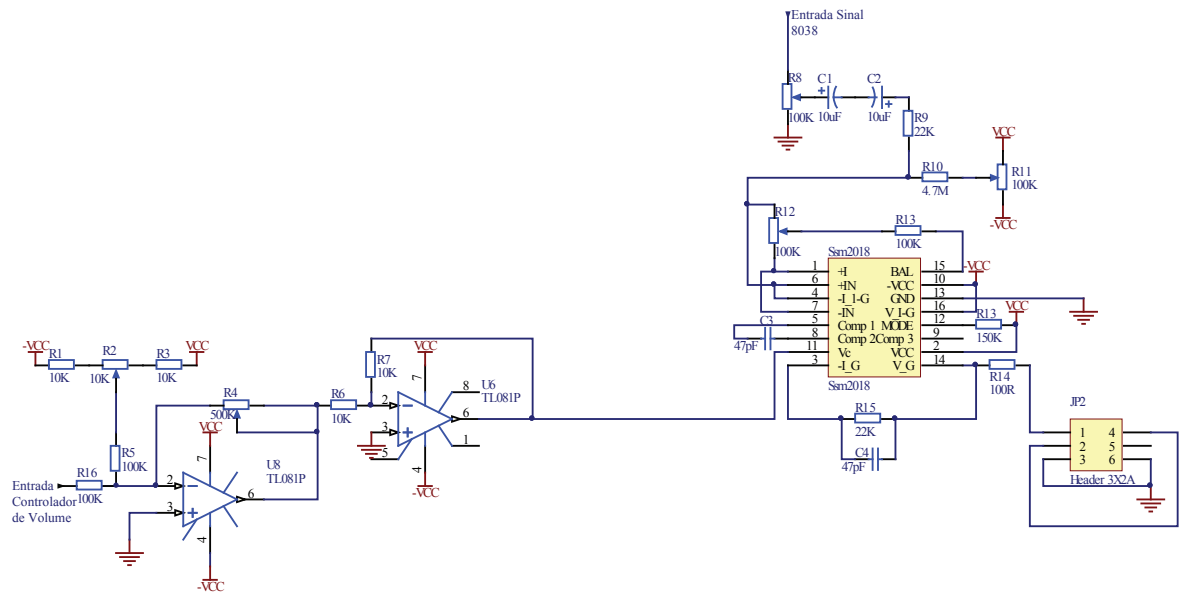


Figura 18: Diagrama do circuito de controle do Ssm2018.

antena de volume o módulo da diferença de potencial entre VCC e o sinal de saída seja menor, resultando em menor ganho de amplitude quando este sinal é colocado ao pino 11 do Ssm2018.

Um potenciômetro de $100k\Omega$ é utilizado para ajuste do nível de entrada do sinal gerado pelo 8038 para o VCA, e para correção de bias deste são utilizados dois capacitores eletrolíticos em série, $C1$ e $C2$. Como após a saída da associação de capacitores há um sinal de tensão e é necessário um sinal de corrente é utilizado o resistor $R9$ para que este sinal seja convertido de tensão para corrente e então vai para os pinos 4 e 6 do Ssm2018. Neste sinal é inserido um ajuste de offset a partir dos resistores $R11$ e $R10$ para correção de pequenas variações causadas pela tensão de controle do volume. Para prevenir que o Ssm2018 entre em oscilação (ANALOG-DEVICES, 1999) é colocado o capacitor de compensação $C4$ entre os pinos 5 e 8. Para ajustar o ganho de corrente do Ssm2018 de maneira que minimize o ruído e distorção deve-se colocar o resistor $R13$ de $150k\Omega$. Assim o Ssm2018 irá se comportar como um amplificador Classe B (MILLMAN; HALKIAS, 1981).

O sinal de saída está no pino 14 do Ssm2018, que é acoplado a um potenciômetro pra ajuste do volume máximo de saída e ao conector do tipo $P2$ para fones de ouvido e caixas de som amplificadas de baixa impedância de entrada e cuja corrente de entrada seja de

até $\pm 1.3mA$. O Potenciômetro deve ser inserido nos Pinos 1,2 e 3 do *JP2*, de maneira que o pino central do potenciômetro esteja ligado ao pino 2 e o pino *CW* do potenciômetro ligado ao pino 1. O conector *P2* Mono deve ser conectado aos pinos 4 e 6 do *JP2*, sendo que o *GND* do *P2* esteja no pino 6 e o sinal no pino 4.

O esquemático completo pode ser visto em na figura 19. Cada circuito integrado possui um capacitor de $100nF$ acoplado do pino *GND* ao pino de alimentação para filtro de chaveamento interno, contudo neste esquemático estes componentes estão omitidos.

5 Montagem

A montagem do theremin teve início com o estudo do diagrama esquemático elaborado por alunos do curso de Física da Universidade de Glasgow, como trabalho de conclusão de curso (SKELDON et al., 1998). Todos os componentes envolvidos foram analisados e o efeito de cada parte do circuito foi identificado. Também foi pesquisada a disponibilidade de tais componentes em lojas locais, o que não foi possível no caso do CI 8038. Nesse caso, o componente foi adquirido via internet em uma loja virtual localizada no eBay.

Em seqüência o diagrama foi desenhado e adaptado no software Altium Designer (Figura 19), que tornou possível a criação do desenho da placa para impressão. No software, foi necessário o desenho manual de todas as trilhas conectando cada componente. Com o desenho da placa em dupla camada pronta, os desenhos dos layers foram submetidos ao LADHA (Laboratório de Desenvolvimento de Hardware) na UTFPR para confecção da placa utilizando uma fresadeira. O desenho da placa está disponível nas figuras 24, 25 e 26, prontas para confecção de decalque para circuito impresso.

Após cerca de uma semana da submissão dos desenhos ao LADHA a placa estava pronta e pode-se dar início a solda dos componentes. Pelo fato de cada camada da placa não ter conexão uma com a outra, certas ilhas precisaram ser conectadas com um pequeno fio de cobre, soldado em ambos as camadas. Durante a solda ocorreram curtos-circuitos em certos pontos, devido à dificuldade causada pela proximidade da malha residual, característica da confecção da placa em fresadeiras, às ilhas de solda. Isolando regiões da placa com o uso de um estilete, os curtos-circuitos foram identificados e eliminados. Antes de inserir os circuitos-integrados na placa, foi feito um teste de alimentação e outro teste

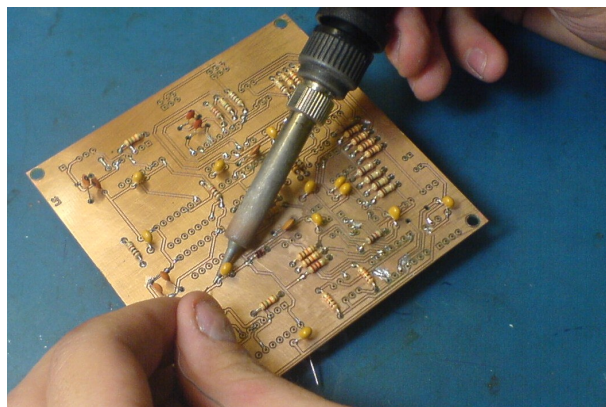


Figura 20: Etapa da montagem da placa, onde estão sendo soldados os capacitores

final contra curtos-circuitos. Verificado que as tensões de alimentação estavam corretas, o resto do circuito foi montado, o qual pode ser visto na figura 21.

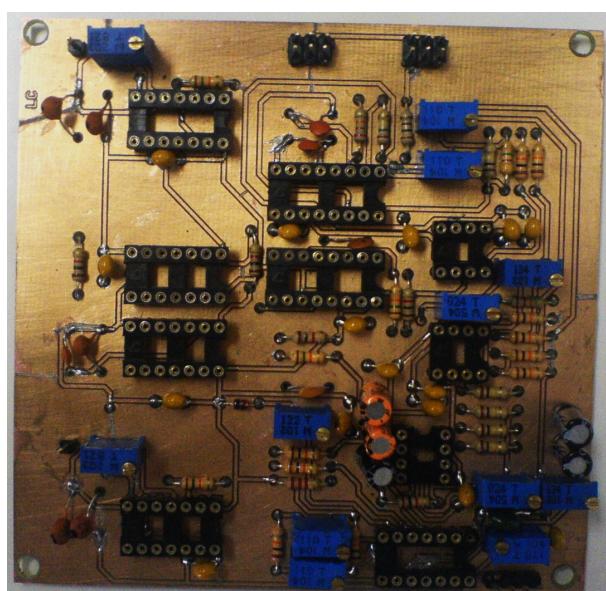


Figura 21: Placa após finalizada a etapa de solda, sem os circuitos integrados conectados aos soquetes.

Para o theremin, foi feita a montagem em um gabinete de dimensões apropriadas. A placa foi parafusada em um suporte de acrílico, que por sua vez foi fixado dentro deste gabinete, como visto na figura 22. Foi acoplado ao painel a saída de áudio P2 e botões para controle do tipo de onda gerada e volume máximo. Por último, as antenas foram fixadas e conectadas à placa. a montagem final pode ser vista na figura 23. Durante os testes, percebeu-se que a antena para controle de volume não estava funcional, o que após a identificação de uma solda fria foi corrigido. Durante os testes de fechamento o circuito

parou de funcionar, e após análise do circuito foi constatada uma falha na solda de um capacitor. Após esta correção o sistema funcionou sem maiores problemas.

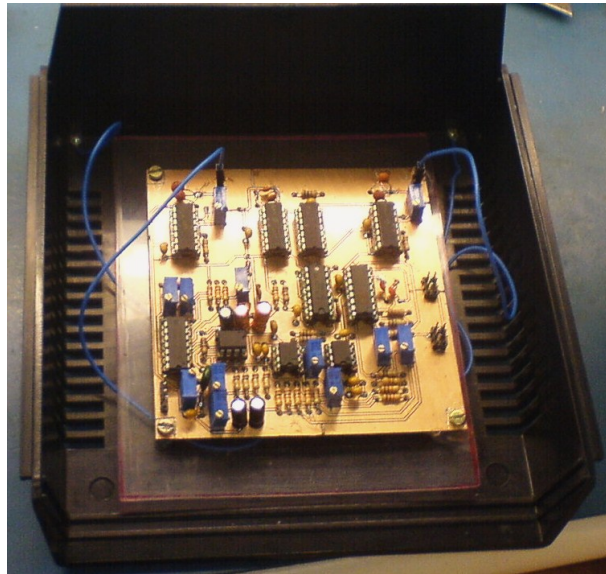


Figura 22: Fixação da placa na caixa

Por fim restou a calibração do circuito, que envolve vários potenciômetros. Ajustes foram feitos de forma experimental para obter uma distância de operação da antena aceitável, assim como a afinação das notas produzidas. Por fim, fontes de alimentação de 15V foram instaladas juntamente com um conector de tomada externo, de forma a ter o produto em sua forma final e pronto para uso.

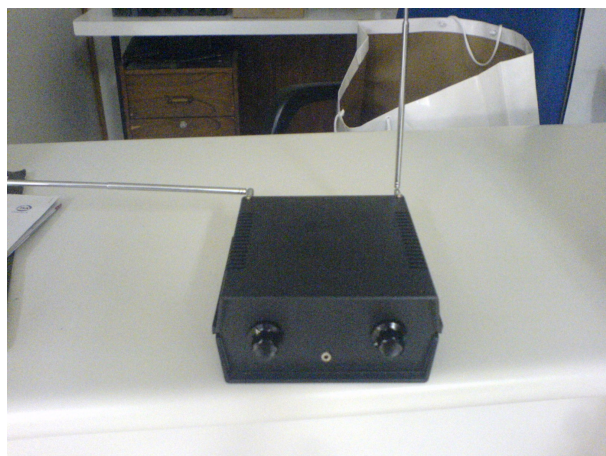


Figura 23: theremim após finalizada a montagem

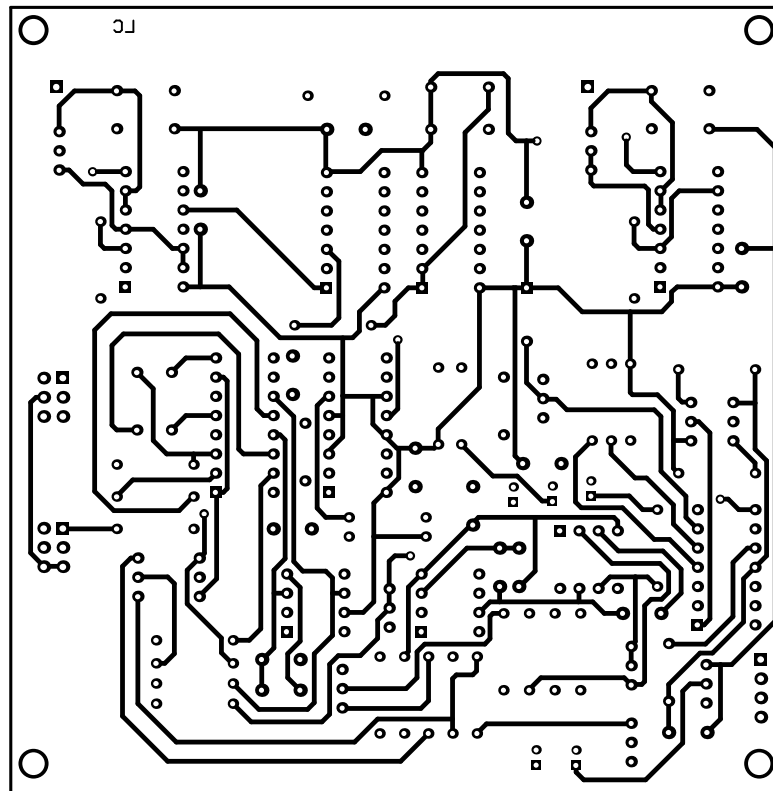


Figura 24: Desenho do Top Layer

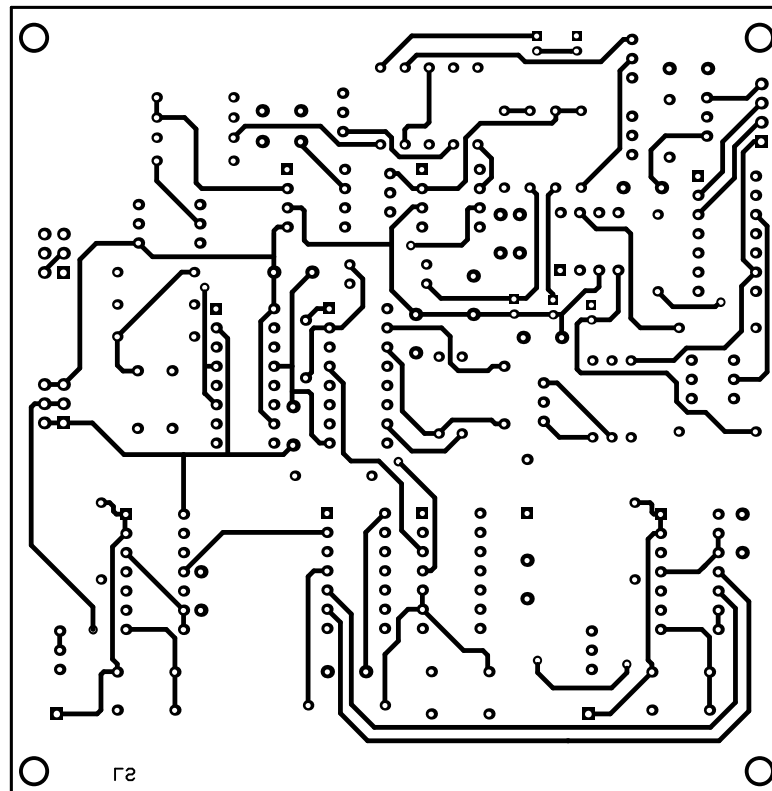


Figura 25: Desenho do bottom Layer

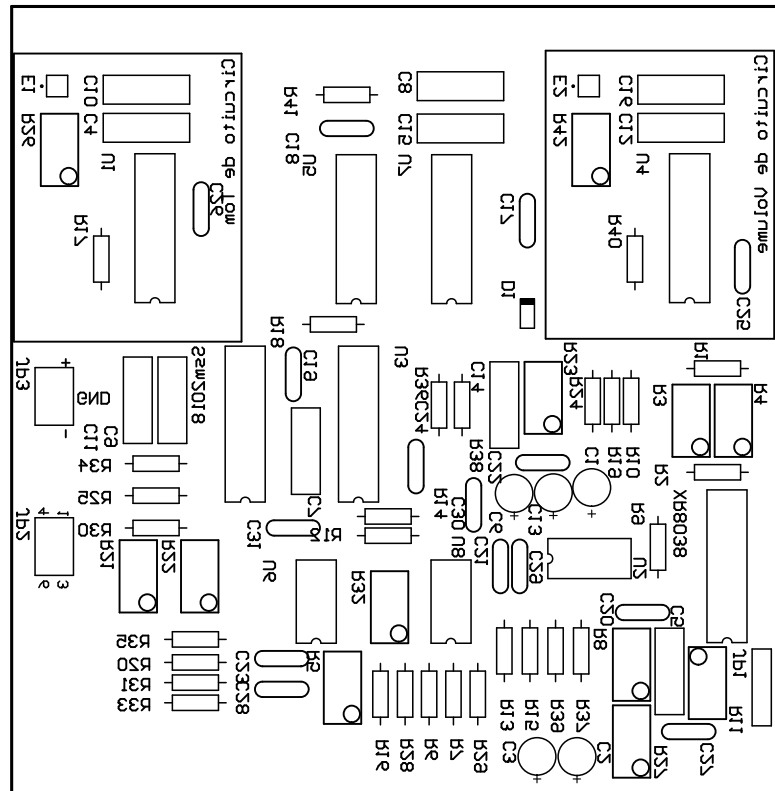


Figura 26: Desenho do Silk Screen Top Layer

O custo de montagem do theremin foi estimado em R\$230,00, com os valores distribuídos da seguinte forma:

- Confeção da placa (R\$50,00);
- Gabinete (R\$20,00);
- Componentes diversos: resistores, capacitores, potenciômetros, antenas (R\$50,00)
- 8038 (R\$40,00);
- 2018 (R\$30,00);
- Fonte de alimentação (R\$40,00).

6 Conclusão

Através da realização do projeto, foi possível estudar o sistema de sensores capacitivos assim como uma implementação digital deste. Para o theremin, este sensor é aproveitado utilizando grande parte de sua capacidade, sendo possível determinar a distância da mão à antena e utilizar isto para os controles de frequência e volume. Esse controle de distância possui alta sensibilidade e depende inclusive da umidade do ar, pois esta altera a permissividade do dielétrico que separa a mão da antena, variando a capacitância do conjunto. Portanto, uma das maiores dificuldades em manter o sistema funcionando é a calibração correta da frequência de base de cada antena, sendo necessário inclusive que as antenas de volume e tom não possuam a mesma frequência de oscilação, para que a interferência entre os circuitos seja mínima, o que é garantido se o tamanho das antenas for diferente.

Estes sensores capacitivos podem ser utilizados em muitas outras aplicações. Uma cogitada pela equipe é o uso em interfaces tangíveis para computador, permitindo dessa forma o acesso à informação a pessoas com necessidades especiais. Outro uso para sensores capacitivos é em botões sensíveis ao toque, onde não é necessário apertar o botão, mas simplesmente tocá-lo, fazendo assim dispositivos de interfaceamento de estado sólido (sem junções mecânicas que se desgastam com o tempo de uso), para produzir equipamentos com maior durabilidade.

Após a montagem do aparelho foi percebida uma pequena instabilidade na frequência de saída do sinal, bem como baixa amplitude do sinal senoidal gerado pelo ICL8038. Como este componente data de fabricação antiga, podendo ter perdido suas características originais de fábrica. Este componente já está descontinuado, e pode ser diretamente substituído pelo NTE864 (NTE, 2008).

Referências

- ANALOG-DEVICES. *SSM2018T Trimless Voltage Controlled Amplifiers*. 1999. Último acesso em 09/06/2009. Disponível em: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/49091/AD/SSM2018.html>>.
- BARILE, J. *Etherwave Pro*. 2005. Último acesso em 13/06/2009. Disponível em: <<http://www.thereminworld.com/theremins.asp?m=1&t=1>>.
- BARILE, J. *What's a Theremin?* 2005. Último acesso em 13/06/2009. Disponível em: <<http://www.thereminworld.com/article.asp?id=17>>.
- BARILE, J. *Mandarintheremin model 83*. 2008. Último acesso em 13/06/2009. Disponível em: <<http://www.thereminworld.com/theremins.asp?m=27&t=32>>.
- BARILE, J. *Junior Theremin Electronic Kit ML209*. 2009. Último acesso em 13/06/2009. Disponível em: <<http://www.thereminworld.com/theremins.asp?m=22&t=27>>.
- FAIRCHILD. *CD4093BC Quad 2-Input NAND Schmitt Trigger*. 1999. Último acesso em 09/06/2009. Disponível em: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/50862/FAIRCHILD/CD4093.html>>.
- FERRO, M. *História da primeira guerra mundial: 1914-1918*. [S.l.]: Lisboa: Edições 70, 1992.
- GLINSKY, A. *Theremin: Ether Music and Spionage*. [S.l.]: University of Illinois Press, 2000.
- HAZEU, H. A. G. *Fifty Years of Electronic Components*. [S.l.]: Publications Department of PRODUCT DIVISION ELCOMA of N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, 1971.
- HENLY, H. *Rhythmicon*. 1932. Último acesso em 10/06/2009. Disponível em: <<http://www.theremin.info/info-95-Rhythmicon.html>>.
- INTERSIL. *ICL8038 Precision Waveform Generator/Voltage Controlled Oscillator*. 2001. Último acesso em 09/06/2009. Disponível em: <<http://www.intersil.com/data/FN/FN2864.pdf>>.

IRWIN, J. D. *Análise de Circuitos em Engenharia*. [S.l.]: Makron Books, 1999.

KENNAN, G. F. *Memoirs*. [S.l.]: Little, Brown & Co., 1972.

LUTHER, R. *Maestro Theremin*. 2005. Último acesso em 13/06/2009. Disponível em: <<http://moogarchives.com/maestro.htm>>.

MATTIS, O. *An Interview with Leon Theremin in Bourges, France*. 1989. Último acesso em 09/06/2009. Disponível em: <http://www.oddmusic.com/theremin/theremin_interview_1.html>.

MILLMAN, J.; HALKIAS, C. C. *Eletrônica 1: Dispositivos e Circuitos*. [S.l.]: McGraw-Hill Inc., 1981.

MOOG, R. *Moog 1954 Theremin*. 1954. Último acesso em 10/06/2009. Disponível em: <<http://www.thereminworld.com/moog1954.asp>>.

NTE. *NTE864 Integrated Circuit Precision Waveform Generator*. 2008. Último acesso em 13/06/2009. Disponível em: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nte/NTE864.pdf>>.

PAVEK. *New... Unique ... Astounding*. 2002. Último acesso em 10/06/2009. Disponível em: <<http://www.pavekmuseum.org/theremin/index.html>>.

PAZZINATO, A. L. *História moderna e contemporânea*. [S.l.]: Ed. Ática, 2005.

PHILIPS. *HEF4070B Quadruple exclusive-OR gate*. 1995. Último acesso em 14/06/2009. Disponível em: <<http://www.standardics.nxp.com/products/hef/datasheet/hef4070b.pdf>>.

RCA. *RCA Theremin*. 2009. Último acesso em 10/06/2009. Disponível em: <<http://www.radiolaguy.com/Theremin.htm>>.

SKELDON, K. D. et al. Physics of the theremin. *American Journal of Physics*, AAPT, v. 66, n. 11, p. 945–955, 1998. Disponível em: <<http://link.aip.org/link/?AJP/66/945/1>>.

STMICROELECTRONICS. *TL081 General Purpose JFET Single Operational Amplifier*. 1998. Último acesso em 09/06/2009.

Disponível em: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/25383/STMICROELECTRONICS/TL081.html>>.

TEXASINSTRUMENTS. *CD4098 - CMOS Dual Monostable Multivibrator*. 2004.

Último acesso em 14/06/2009. Disponível em: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/26897/TI/CD4098.html>>.

THEREMIN, L. 1970. Último acesso em 09/06/2009. Disponível em: <<http://www.ima.or.at/theremin/>>.

THEREMIN, L. Leon theremin: A memoir. 1983.

THEREMIN-WORLD. *An RCA Victor Theremin Registry*. 1996. Último acesso em 10/06/2009. Disponível em: <<http://www.thereminworld.com/RCARegistry.asp>>.

THEREMIN.INFO. *Terpistone*. 2009. Último acesso em 10/06/2009. Disponível em: <http://www.theremin.info/info-56-The_Terpistone.html>.

THEREMIN.INFO. *Theremin Cello*. 2009. Último acesso em 10/06/2009. Disponível em: <http://www.theremin.info/info-51-The_Theremin_Cello.html>.

TOCCI, R. J.; WIDMER, N. S.; MOSS, G. L. *Sistemas Digitais*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2007.

ZVEX. *Jason Barile*. 2005. Último acesso em 13/06/2009. Disponível em: <<http://www.thereminworld.com/theremins.asp?m=13&t=18>>.