

1, 2, 3 Gravando: registrando o áudio com qualidade em sala de aula⁺

*Alex Bellucco*¹

Centro de Ciências Tecnológicas – Universidade do Estado de Santa Catarina

*David William Cordeiro Marcondes*²

Mestrando do programa de Pós-Graduação em Física – UDESC

Joinville – SC

Resumo

O registro do áudio com qualidade aceitável em videogravações, que serão usadas nas pesquisas sobre os processos de ensino-aprendizagem em sala de aula, apresenta-se como um grande obstáculo à pesquisa em educação. Nesse trabalho, apresentamos um aparato que visa minimizar essa dificuldade – o microfone boundary baseado no microfone de zona de pressão Crow (PZM). Descrevemos como construí-lo, além disso, explicamos ainda como montar um pré-amplificador para ampliar o sinal do microfone e, também, uma fonte regulada para prover a alimentação desses aparatos. As gravações obtidas com esses equipamentos apresentam uma qualidade bastante superior às obtidas com os microfones convencionais, potencializando as investigações que se valem desse tipo de registro.

Palavras-chave: *Pesquisa qualitativa; Videogravações; Registro de dados.*

Abstract

The audio record with acceptable quality of video records, which will be used in researches on teaching and learning processes in the classroom,

⁺ 1, 2, 3 Recording: registering high quality audio in the classroom

* *Recebido: outubro de 2015.*

Aceito: maio de 2016.

¹ E-mail: alexbellucco@gmail.com

² E-mail: david.willian.c.m@gmail.com

presents itself as a major obstacle to educational research. In this paper, we aim to present useful information for minimizing this difficulty – the microphone boundary based on pressure zone microphone by Crow (PZM). We describe how to build it, besides explaining how to build a preamplifier to amplify the microphone signal and also a regulated source to provide the power of these apparatus. The recordings obtained with this equipment have a much higher quality than those obtained with conventional microphones empowering investigations which use this type of record.

Keywords: *Qualitative research; Video recordings; Data record.*

I. Introdução

Existe na pesquisa educacional uma enorme dificuldade quando o tema de investigação envolve “como se aprende” (CARVALHO, 2011), ou seja, quando a pesquisa tem por objetivo estudar os processos que desencadeiam a aprendizagem. Nessa situação, há várias formas de se registrar as informações que, a partir da interação com referencial teórico, irão se tornar os dados de pesquisa.

O pesquisador pode realizar notas de campo em um trabalho de inspiração etnográfica, que muitas vezes torna-se demasiadamente longo em vista dos prazos estabelecidos nos projetos de pesquisa – ou nos trabalhos de mestrado e doutorado.

Outro caminho possível é recorrer ao registro em vídeo que, segundo Carvalho (*op. cit.*), constitui uma mudança no paradigma educacional, possibilitando “[...] ultrapassar os limites do observável em relação aos processos de ensino e aprendizagem” (p. 32). Com esse recurso, é possível “ir” e “vir” de forma rápida ao fenômeno delimitado pelo referencial teórico – algo difícil e moroso de fazer com notas de campo, por exemplo.

Por outro lado, o registro em vídeo esbarra em limitações técnicas para uma gravação com qualidade. Quando se trata da gravação de grupos de alunos discutindo e argumentando sobre os fenômenos e conceitos científicos, durante as resoluções de problemas, por exemplo, esse problema cresce exponencialmente. Isso se dá também porque as filmadoras à disposição no mercado possuem microfones embutidos que captam o áudio com baixa qualidade e também muitos ruídos externos, o que dificulta muito a análise dos vídeos nesses momentos de trabalho coletivo.

Para sanar esse problema, alguns pesquisadores usam gravadores individuais para registrar o áudio que será analisado junto com o vídeo – tomando um tempo não disponível – ou sobrepõem o áudio aos registros em vídeo por meio de um software³, ou ainda, ligam vários microfones de lapela em uma mesa de som conectada a um gravador para o registro sonoro.

³ Recomendamos para esse fim o software Sony Vegas.

Mesmo nesses casos, a qualidade da gravação não é das melhores – resultando em muitos trechos inaudíveis – além de tornar o registro muito caro. Isso nos levou a buscar uma forma alternativa de gravação do áudio, que ajudou a ultrapassar essa dificuldade técnica para as pesquisas que envolvem a análise do discurso, e que fosse mais acessível financeiramente.

Dessa forma, a fim de superar essa limitação dos microfones das filmadoras, desenvolvemos um microfone de baixo custo (Fig. 1) do tipo *boundary*, baseado no microfone por zona de pressão da empresa Crow (PZM), que se mostrou eficiente no registro das informações de nossa pesquisa (BELLUCCO, 2015), a qual envolvia o registro do áudio de alunos resolvendo problemas abertos em grupos. Esse tipo de microfone registra uma “zona de pressão” ao seu redor com eficácia, ou melhor, captando o áudio com qualidade em uma configuração semiesférica e registrando o som com menor eficiência fora dessa região.

Um microfone boundary é concebido para ser usado em superfícies como chão, parede, mesa, tampa de piano, deflector ou painel. Um exemplo de um microfone boundary é o microfone por zona de pressão da empresa Crown (PZM) [...]. Ele inclui uma mini cápsula condensadora omnidirecional montada de brucos ao lado de uma placa de reflexão de som ou boundary. Devido a esta construção, o diafragma do microfone recebe os sons direto e refletido [da fonte sonora] em fase para todas as frequências, evitando interferência de fase entre elas. Os benefícios obtidos são uma ampla e suave resposta de frequência, livre de cancelamentos de fase, excelente nitidez e "alcance", um padrão polar semiesférico e resposta de frequência uniforme em qualquer lugar ao redor do microfone (BARLTETT; BARTLETT, 2007, p. 103).

Desenvolvemos também um pré-amplificador de baixo custo que aumenta a intensidade do sinal gerado por esse microfone, melhorando a qualidade da captação do som. A descrição sobre como funciona o circuito pré-amplificador encontra-se em anexo, para não desviar o foco deste trabalho da construção do sistema de captação.

Assim, o microfone foi ligado ao pré-amplificador e este ao gravador digital (esse conjunto, microfone mais pré-amplificador, poderia ser ligado diretamente na filmadora, caso ela tenha entrada para microfone externo), possibilitando uma gravação eficiente do trabalho dos alunos e, surpreendentemente, dos momentos de fala do professor, sem o ruído de fundo típico dessas gravações – ou seja, a conversa dos outros grupos não prejudicou o registro do grupo de análise. Em nossa pesquisa (BELLUCCO, 2015), mesmo nas gravações no pátio, onde ocorreu uma forte ventania, ou seja, uma situação que costuma estragar completamente o áudio das videograções, não houve problema com o áudio e a captação das discussões em grupos. Ainda nos registros da turma do ensino médio, usamos dois microfones tipo PZM simultaneamente para registrar o som de um grupo, uma vez que o gravador dispunha dessa possibilidade, melhorando significativamente a captação do áudio.

Descrevemos nesse trabalho, primeiramente como construir o microfone, o pré-amplificador e a fonte de alimentação, que permitem o registro do áudio com uma qualidade

bastante superior aos equipamentos tradicionalmente usados nesse tipo de pesquisa. Na sequência, explicamos como construir os circuitos pelo método de transferência térmica.

II. Gravando: o microfone tipo PZM, o pré-amplificador e a fonte de alimentação

O Microfone tipo PZM (Fig. 1) é construído com uma chapa de metal de 10 cm x 10 cm, um eletreto, um pedaço de calha para fio, cola quente, um cabo blindado e um plugue P10⁴. Desses materiais, apenas a chapa de metal não é encontrada em lojas de componentes eletrônicos – no nosso microfone reciclamos uma lateral de um gabinete de um computador. Segue uma vista geral do microfone que fica apoiado sobre a mesa (que ajuda a captar melhor as ondas sonoras do ambiente):

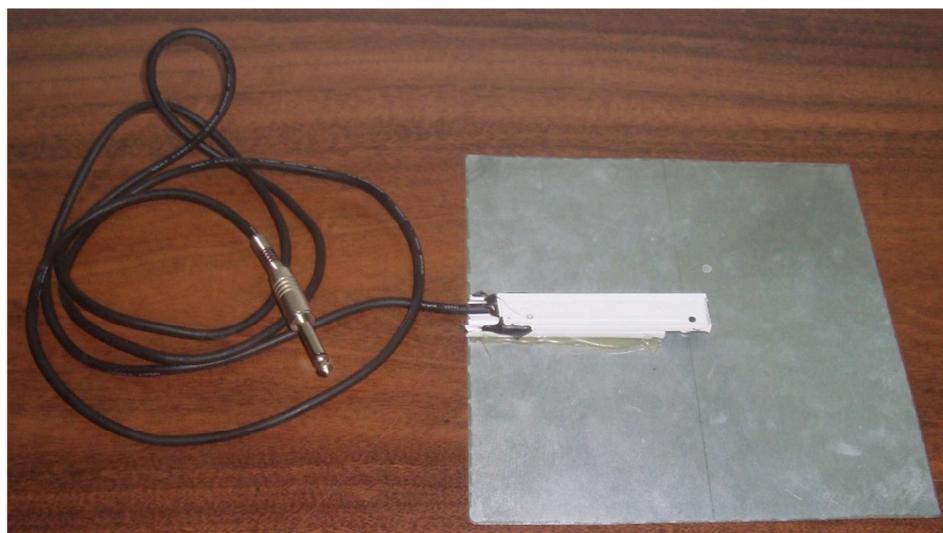


Fig. 1 – Microfone tipo PZM.

O cabo blindado⁵ é ligado ao eletreto (Fig. 2), no qual a malha do cabo é soldada no polo negativo do eletreto⁶, e o fio do meio do cabo blindado é soldado no outro polo do eletreto.

⁴ Recomendamos que os plugues e jacks sugeridos ao longo deste trabalho sejam de qualidade, para evitar problemas de captação, como ruídos e mau contato. As marcas Neutrik, Amphenol e Switcraft são as melhores. Usamos também plugues P10 da marca Santo Ângelo com bons resultados.

⁵ O cabo blindado é constituído por uma “malha” de fios que envolve um fio central. Essa malha funciona como uma gaiola de Faraday, evitando interferências eletromagnéticas no fio central.

⁶ Para identifica-lo basta colocar a ponta de um multímetro em um dos polos do eletreto e a outra na carcaça do eletreto e fazer o teste de continuidade, o polo negativo é o que apita durante esse teste (na figura 2 é o pino do lado esquerdo – no qual saem três “trilhas” que o ligam até a carcaça).



Fig. 2 – Eletreto.

O eletreto deve ser fixado com cola quente na calha a uma distância de aproximadamente 1mm da placa de metal. A calha deve ser colada na placa de metal, também com cola quente (algumas calhas já vem com fita dupla face, podendo ser coladas diretamente na placa), da seguinte forma:



Fig. 3 – Fixação da calha e do eletreto

A outra extremidade do cabo blindado deve ser soldada no plugue P10 na forma mostrada na Fig. 4.

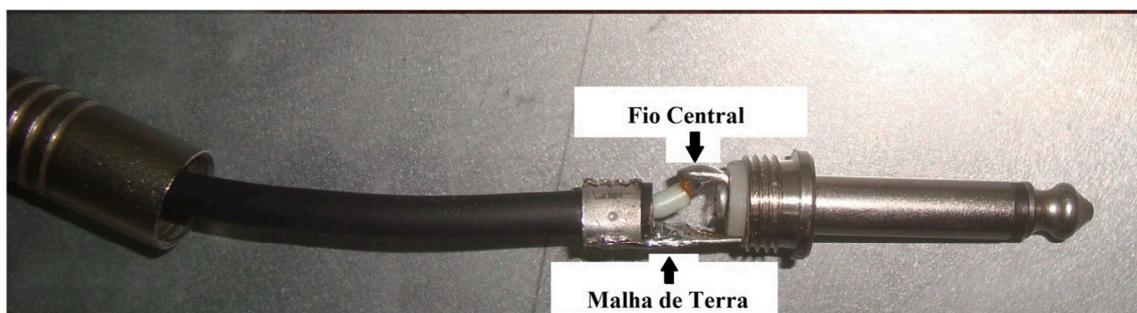


Fig. 4 – Ligando o plugue P10 ao cabo blindado

O pré-amplificador é baseado no circuito *Low Noise Microphone Preamplifier* do site *Elliot Sound Products*⁷:

⁷ Disponível em: <<http://www.sound.westhost.com/project13.htm>>. Acesso em: 16 mai. 2016.

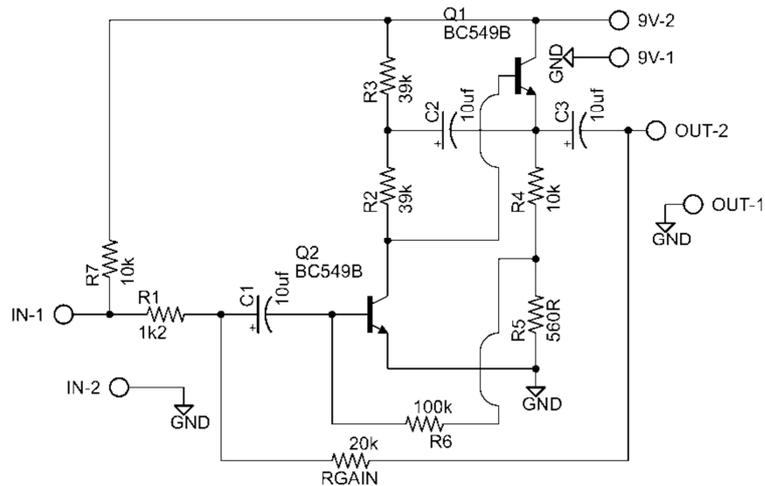


Fig. 5 – Esquema elétrico do pré-amplificador.

Tabela 1 – Componentes do pré-amplificador.

Componentes do Pré-amplificador do Microfone		
	Símbolo	Valor
Capacitores Eletrolíticos de no mínimo 16V	C1	10uf
	C2	10uf
	C3	10uf
Transistores	Q1	BC549
	Q2	BC549
Resistores de 1/4W	R1	1k2
	R2	39k
	R3	39k
	R4	10k
	R5	560R
	R6	100k
	R7	10k
	RGAIN	20k ou potenciômetro de 50k (ver texto)

Incluímos por meio de um resistor de 10k (R7) uma alimentação para o eletreto. O resistor RGAIN regula o ganho do circuito e pode ser trocado por um potenciômetro⁸ de 50k, dependendo do gravador utilizado, para ajustar o volume da gravação. No nosso caso, deixamos o valor de 20k, pois o gravador Zoom H4n já possui uma regulagem de ganho do microfone. Os pontos 9V1 e 9V2 devem ser soldados respectivamente, por meio de um cabo blindado.

⁸ Recomendamos as marcas Alpha ou CTS, pois costumam ser as mais duráveis.

dado, aos pinos de terra e de tensão de um plugue J4⁹. O plugue P10 deve ser ligado por meio de um jack J10 mono ao *in* do circuito da Fig. 5, outro jack J10 deve ser ligado ao *out* do circuito que deve ir ao gravador.

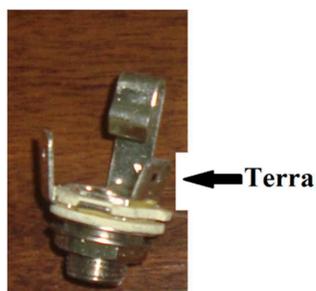


Fig. 6 – Jack J10.

O circuito da Fig. 5 pode ser construído em uma placa de fenolite ou fibra de vidro para circuitos¹⁰ a partir do layout mostrado na Fig. 7.

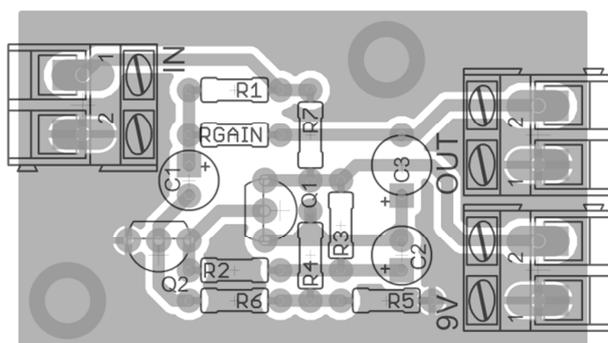


Fig. 7 – Layout do circuito do pré-amplificador.

A Fig. 8 mostra os dois circuitos de pré-amplificação confeccionados em uma mesma placa, para usar os dois microfones tipo PZM da pesquisa. É importante usar cabos blindados para ligar os jacks J10 ao pré-amplificador – os cabos na imagem são fixados por parafusos à placa por meio de bornes KF-128 de dois terminais (componentes quadrados de cor azul na foto), porém eles podem ser soldados diretamente na placa.

⁹ Mostramos como fazer essa ligação um pouco adiante, ao descrever como construir a fonte de alimentação.

¹⁰ Descrevemos como construir o circuito no próximo tópico.

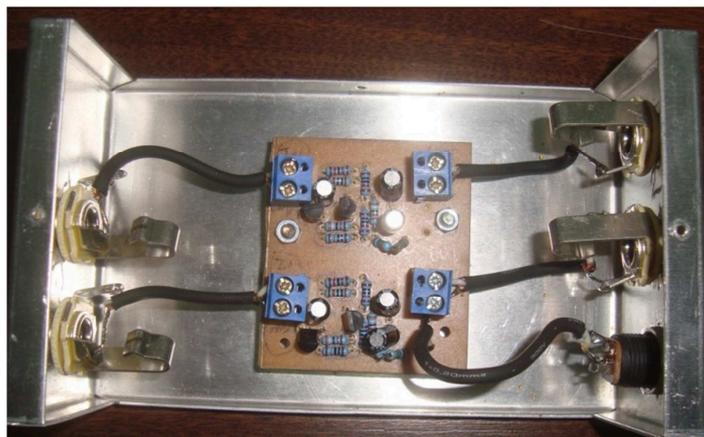


Fig. 8 – Vista dos pré-amplificadores usados na pesquisa.

Na Fig. 9, dispomos o layout para transferência térmica da placa do pré-amplificador.

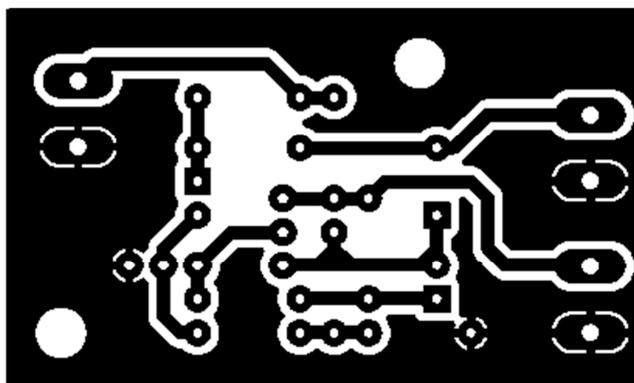


Fig. 9 – Figura para transferência térmica do layout da placa do circuito do pré-amplificador (2,5cm x 4,6 cm).

O esquema do circuito da fonte de alimentação abaixo foi retirado do site Handmades¹¹. Ele é fundamental, pois filtra muito bem os ruídos provenientes da rede elétrica. Recomendamos o uso de capacitores de no mínimo 32V. O pontos AC-1 e AC-2 devem ser ligados em um transformador de 12V por 250mA, que deve ser ligado em um cabo e um plugue de tomada¹².

¹¹ Disponível em: <<http://www.handmades.com.br/forum/index.php?topic=3464.0>>. Acesso em: 16 mai. 2016.

¹² O plugue de tomada e seu respectivo cabo devem ser ligados aos fios amarelo e preto do circuito primário do transformador para tensões da rede de 110V, ou aos fios vermelho preto para tensões da rede de 220V. **Não se esqueça de isolar bem as ligações com fita isolante.** Na dúvida peça para o vendedor da loja explicar como são as ligações. O link a seguir ensina a fazer a ligação com uma chave seletora de tensões: <http://i137.photobucket.com/albums/q227/lafaller/Chaveseletora110_220.jpg>. Acesso em: 16 mai. 2016.

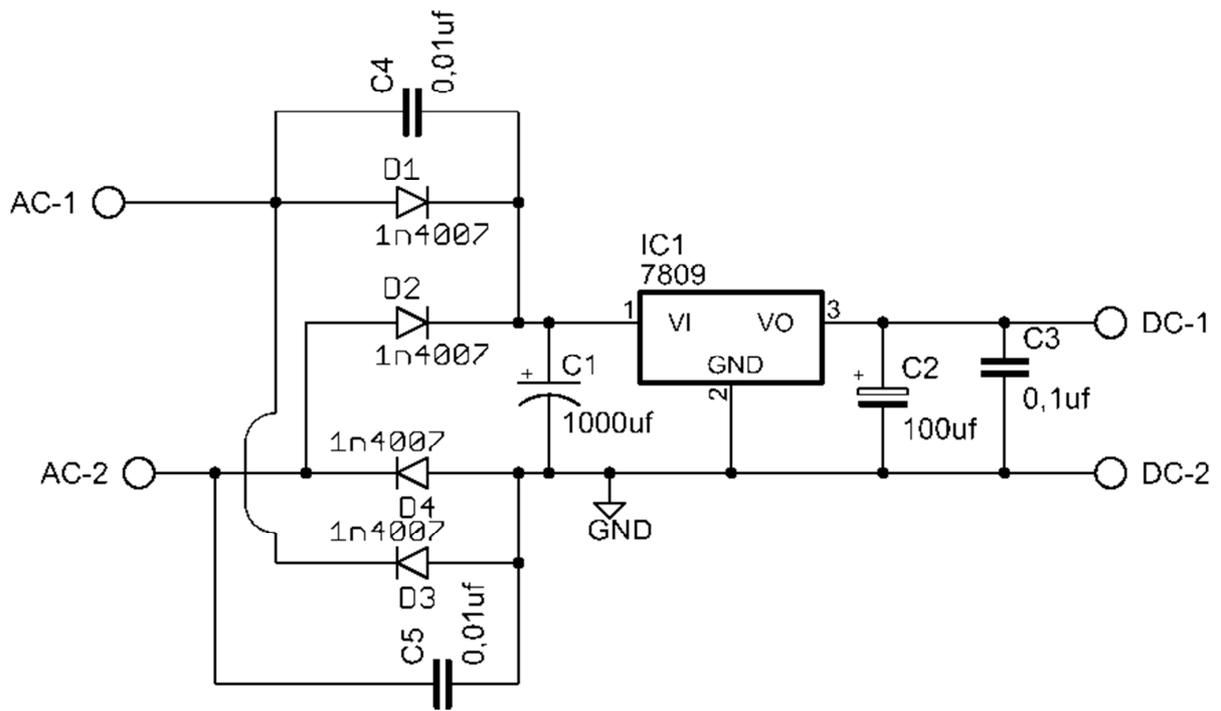


Fig. 10 – Esquema elétrico da fonte de alimentação.

Tabela 2 – Componentes da Fonte.

Componentes da Fonte		
	Símbolo	Valor
Capacitores Eletrolíticos de no mínimo 16V	C1	1000uf
	C2	100uf
Capacitores cerâmicos	C3	0,1uf
	C4	0,001uf
	C5	0,001uf
Diodos	D1	1n4007
	D2	1n4007
	D3	1n4007
	D4	1n4007
Circuito integrado	IC1	7809
Transformador		12V de 250mA

Os pontos DC-1 e DC-2 (terra), devem ser ligados a um jack J4.

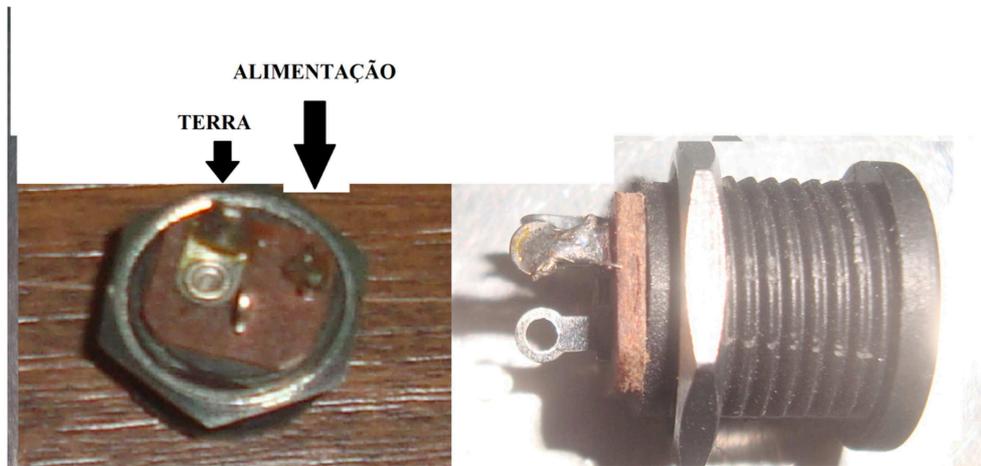


Fig. 11 – Jack J4.

Na Fig. 12, temos o layout para da placa da fonte de alimentação e a figura para transferência térmica da mesma.

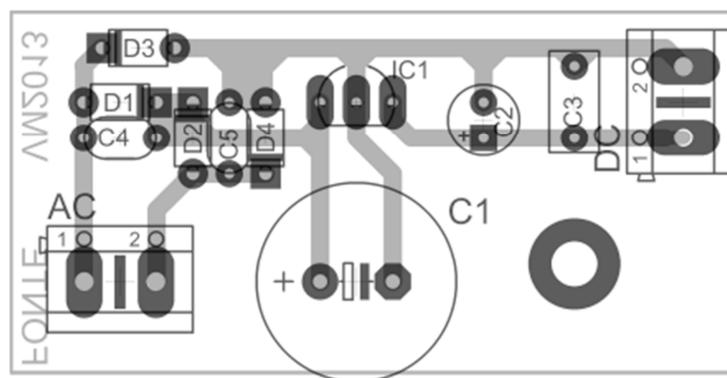


Fig. 12 – Layout da placa da fonte de alimentação.

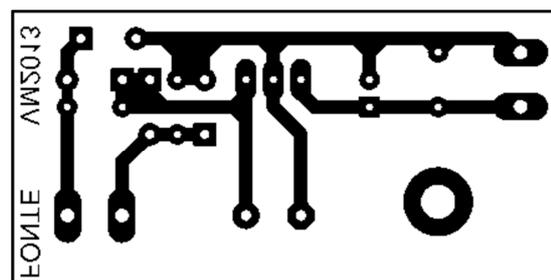


Fig. 13 – Figura para transferência térmica da fonte de alimentação (2,5cm x 5,1cm).

São necessários dois jacks J4, um deles deve ser ligado ao pré-amplificador e o outro à fonte. O pré-amplificador deve ser ligado à fonte por meio de um cabo confeccionado com dois plugues P4 e qualquer fio duplo.

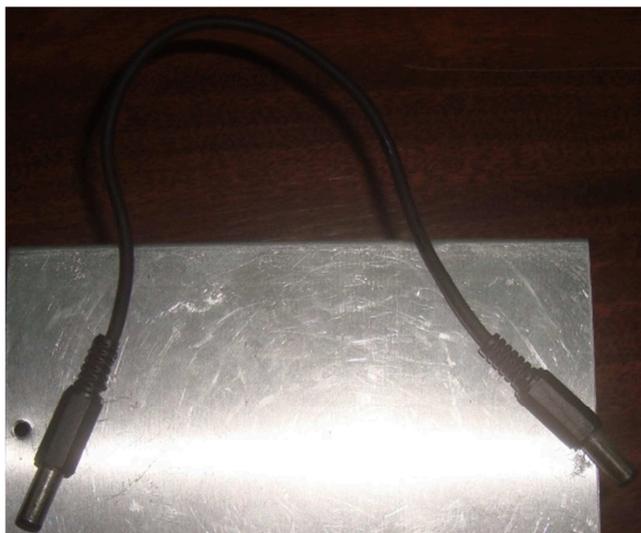


Fig. 14 – Cabo de ligação entre o pré-amplificador e a fonte de alimentação.

Por fim, segue uma imagem geral do aparato (os cabos que vão para o gravador – indicados por “Saída para o gravador” na Fig. 15 – são feitos com plugues J10 e cabos blindados).

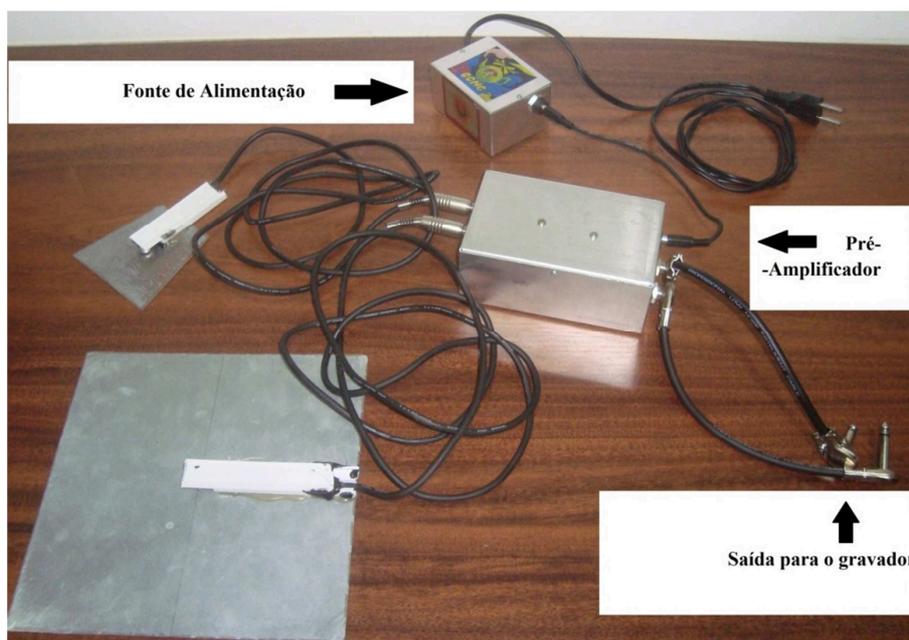


Fig. 15 – Visão geral do aparato construído para gravação.

É essencial colocar os circuitos em caixas de metal, que funcionam como gaiolas de Faraday, impedindo que haja interferência eletromagnética nos mesmos – algo que gera muito ruído nas gravações.

III. Construindo um circuito impresso

Para a construção das placas de circuito impresso pelo método de transferência térmica¹³ são necessárias uma placa de fenolite ou fibra de vidro para circuitos (adquirida em lojas de eletrônica), folha de papel glossy¹⁴ ou couchê¹⁵, impressora a laser ou impressora eletrostática, percloroeto de ferro (também disponível em lojas de eletrônica), vasilha de plástico, furadeira¹⁶ e broca de 1 mm ou furador de placa, verniz para placas de circuito impresso, ferro de passar roupa (obtermos melhores resultados com ferros mais simples e baratos, ou melhor, sem base antiaderente), palha de aço e detergente líquido.

As Fig. 9 e 13 devem ser impressas no lado brilhante do papel¹⁷. A placa de fenolite deve ser cortada de um tamanho um pouco maior que a figura a ser transferida e lavada com detergente e o auxílio de uma palha de aço, a fim de criar ranhuras que facilitem a adesão do toner à placa. Seque bem a placa logo em seguida.

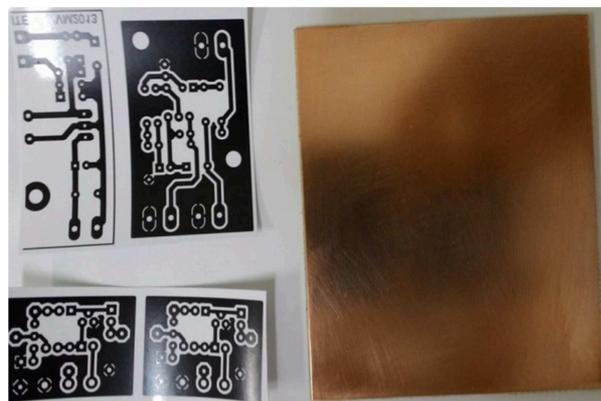


Fig. 15 – Imagens para transferência.

Depois, deve-se aquecer o ferro de passar em temperatura máxima e esquentar a superfície cobreada da placa por aproximadamente 20 segundos. Na sequência, coloca-se o desenho sobre a placa, com cuidado para não se queimar e não deslizar o papel, e passa-se o ferro entre 5 min e 10 min¹⁸ sobre toda a sua superfície (Fig. 17).

¹³ No fórum “Handmades” há informações úteis sobre como confeccionar a placa, disponível em: <http://www.handmades.com.br/forum/index.php?page=pci_transfer_term>. Acesso em: 16 mai. 2016.

¹⁴ Obtemos melhores resultados com 150g de gramatura.

¹⁵ Pode-se reciclar também qualquer folha de propaganda impressa nesse tipo de papel, com bons resultados.

¹⁶ A furadeira ou uma micro retífica é mais adequada quando o circuito é de fibra de vidro.

¹⁷ Dispomos o arquivo no tamanho correto para impressão no seguinte link (é importante imprimir com a opção “Tamanho Real”): <<https://www.dropbox.com/s/t9umyegzjmwxdkr/123%20gravando%20-%20figuras%20para%20transfer%C3%Aancia%20t%C3%A9rmica.pdf?dl=0>>. Acesso em: 16 mai. 2016.

¹⁸ Esse tempo pode variar dependendo da marca do ferro de passar – alguns modelos não esquentam o suficiente para soltar o toner da impressora da folha de papel, logo, deve-se usar modelos de maior potência.



Fig. 17 – Transferindo o toner para a placa de fenolite.

Após esse período, é necessário esperar que a placa esfrie até a temperatura ambiente. É preciso retirar o papel cuidadosamente – nesse processo, o toner soltará do papel e será transferido para a placa de circuito (Fig. 18). Se a transferência for realizada com papel couchê, é necessário deixar a placa de molho na água por alguns minutos antes de retirar o papel com cuidado.



Fig. 18 – Desenho do circuito transferido.

Caso o desenho não tenha sido transferido totalmente (como na figura acima), podem ser feitos ajustes no mesmo com uma caneta de retroprojektor (Fig. 19) – é importante que a tinta não seja solúvel em água, pois na próxima etapa ela pode se soltar. Um estilete pode ser usado para corrigir erros no desenho ocorridos durante o ajuste à mão.

Com o desenho transferido para a placa, coloca-se a mesma em uma vasilha de plástico com o percloro de ferro¹⁹ para a corrosão do cobre que ficou exposto na placa. Esse processo leva entre 15 a 30 minutos dependendo da temperatura ambiente. É preciso cuidado com os respingos do percloro, pois além de manchar roupas e superfícies definitivamente,

¹⁹ Destacamos que o percloro de ferro pode ser reaproveitado várias vezes e pode ser reciclado quando perder o efeito corrosivo. No site a seguir há um tutorial sobre como fazer isso:
<<http://www.handmades.com.br/forum/index.php?topic=1192.0>>. Acesso em: 16 de mai. 2016.

ele corrói qualquer superfície metálica que entrar em contato. Recomendamos furar a placa e amarrar uma linha na mesma para facilitar o manejo nessa fase do processo (Fig. 20).

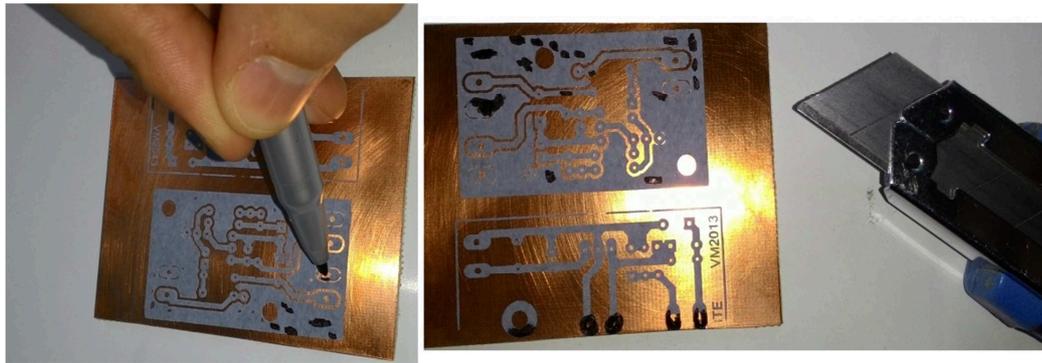


Fig. 19 – Desenho do circuito com ajustes à mão.



Fig. 20 – Processo de corrosão do cobre exposto na placa.

Ao corroer toda a superfície exposta de cobre, deve-se lavar bem a placa com detergente líquido, esfregando bem o desenho com uma palha de aço para remover todo o toner (Fig. 21). Ao término desse processo, é importante envernizar o circuito com um spray específico para esse fim vendido em lojas de produtos para eletrônica.

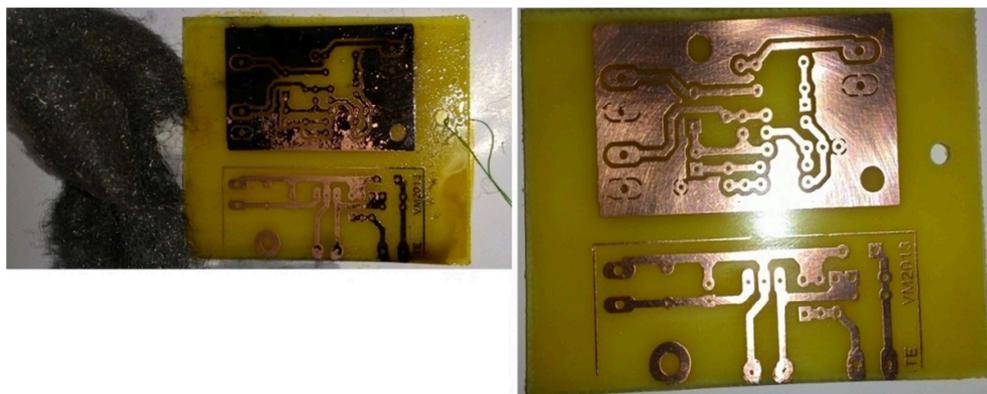


Fig. 21 – Limpeza final da placa.

Finalmente, é necessário furar as ilhas da placa onde serão inseridos os componentes (Fig. 22). Para placas de fibra de vidro, que são mais duráveis, é mais recomendado usar uma furadeira com uma broca de 0,8mm ou de 1mm. Com as placas de fenolite o furador próprio para placas de circuito funciona muito bem.



Fig. 22 – Furando a placa.

Soldando os componentes

A última etapa consiste em soldar os componentes na placa²⁰ – recomendamos que se desenhe no lado oposto do circuito o código dos componentes, com o intuito de evitar a sua soldagem e valores errados (Fig. 23). É fundamental ficar atento ao sentido e à polaridade de alguns componentes, tais como os capacitores eletrolíticos²¹ (que possuem um polo negativo e outro positivo – os quais estão indicados pelo sinal de mais no desenho a seguir), os diodos (que possuem um sentido indicado por um traço transversal ao componente em uma de suas extremidades – D1, D2, D3 e D4 na figura abaixo) e os transistores e circuitos integrados (que tem um lado reto e outro curvo – como os componentes IC1, Q1 e Q2 abaixo).

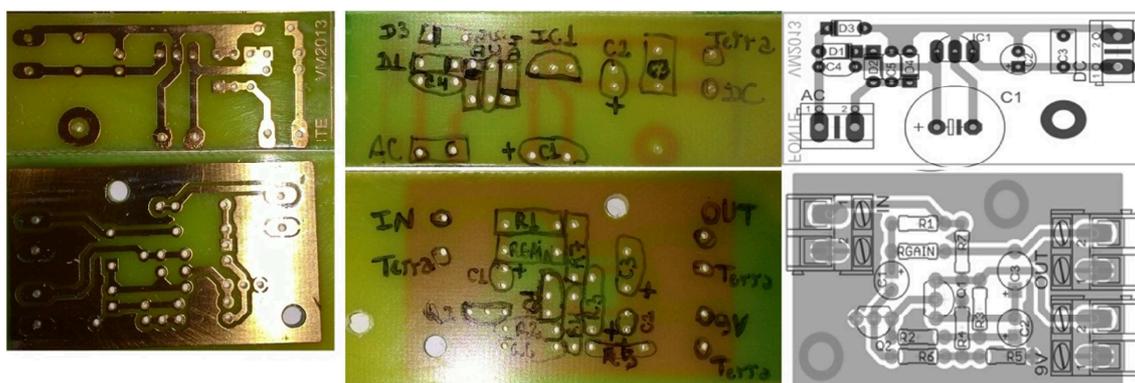


Fig. 23 – Placas prontas para a soldagem dos componentes.

²⁰ O link a seguir contém informações úteis sobre o processo de soldagem: http://www.handmades.com.br/forum/index.php?page=apr_soldar. Acesso em: 16 de mai. 2016.

²¹ Nos capacitores eletrolíticos há uma indicação em sua lateral (sinais negativos), mostrando a polaridade do terminal.

Vale a pena treinar o processo de soldagem em uma placa de teste, evitando queimar componentes. Para uma boa soldagem, deve-se tocar a perna do componente com a ponta do ferro de solda e, simultaneamente, a ilha (ou o local) onde ele será soldado e colocar o estanho por cima, que deve se espalhar uniformemente pela ilha. Esse processo não deve passar de dois a três segundos. No caso dos transistores, recomenda-se soldar uma perna, esperar esfriar antes de soldar a seguinte e assim por diante, evitando a queima desse componente que costuma ser mais sensível ao calor. Além disso, a solda deve estar brilhante e lisa – soldas rugosas e opacas não conduzem bem o sinal elétrico, gerando ruídos ou mesmo impedindo o funcionamento do circuito. Após fixar um componente, deve-se remover sua perna com um alicate de bico (Fig. 24).



Fig. 24 – Soldando os componentes.

IV. Considerações finais

Procuramos ao longo deste trabalho contribuir para a melhoria na captação de informações por meio de vídeogravações, ou seja, uma dificuldade técnica problemática nas pesquisas que envolvem a análise dos processos de ensino-aprendizagem em sala de aula.

No link a seguir realizamos uma gravação comparativa entre os microfones da câmera, do gravador e do tipo PZM, a fim de mostrar a melhor eficiência deste último: <<https://youtu.be/gZrAYXjwbJk>>. Nesse registro, há duas pessoas, um homem de frente para o microfone do gravador e uma mulher atrás desse microfone, que leem um texto em um ambiente com várias pessoas falando e fazendo barulho simultaneamente. É interessante notar a redução da qualidade da captação da voz feminina que ficou atrás do microfone do gravador em relação à gravação do microfone tipo PZM.

Por fim, a captação de áudio desses registros foi significativamente potencializada com esse equipamento, possibilitando acompanhar com bastante precisão o diálogo de um grupo de alunos, em condições normais de sala de aula, ao longo de nossa pesquisa (BELLUCCO, 2015). Dessa forma, esperamos que esse aparato contribua para outras pesquisas que necessitem desse tipo de registro de informações.

Agradecimentos

A construção desse equipamento não seria possível sem as valiosas contribuições dos amigos Alex Frias e Guilherme Ferreira Ribeiro, aos quais dedicamos um agradecimento especial.

Agradecemos aos bolsistas do PIBID-Física da UDESC pela colaboração nas gravações deste trabalho.

Referências bibliográficas

BARLTETT, B.; BARTLETT, J. **Record music on location: capturing the live performance**. Burlington: Focal Press, 2007, 320 p.

BELLUCCO, A. **Argumentação matemática em aulas investigativas de física**. 2015. 251f. Tese (Doutorado em Educação em Ensino de Ciências e Matemática) - Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CARVALHO, A. M. P. Uma metodologia de pesquisa para estudar os processos de ensino e aprendizagem em salas de aula. In: SANTOS, F. M. T.; GRECA, I. M. (Eds.). **A pesquisa em ensino de ciências no Brasil e suas metodologias**. 2. ed. Ijuí: Unijuí. v. 1. p. 13-47, 2011.

GONZALEZ, F. **Curso Mr. Eletrônico**. Pereira: CEKIT, 1999.

BRAGA, N.C. **Revista Eletrônica Total**, n.137. São Paulo: Saber Eletrônica, 2004.

SILVA, M. M. **Circuitos com Transistores Bipolares e MOS**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999. 523p.

PALUMBO, G.; PENNISI, S. Feedback Amplifiers: Theory and Design. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. 279p.

Anexo: Funcionamento do circuito

A função principal do circuito da Fig. 25 é amplificar o sinal do microfone de eletreto a ponto de torná-lo suficiente para excitar o circuito de gravação. Para compreender como se dá este processo, vamos dividir a análise do circuito em três partes: 1º conversão do som em sinal elétrico, 2º conversão do sinal em AC (corrente/tensão alternada) para DC (tensão/corrente contínua) e 3º amplificação deste sinal. Também vamos utilizar um conceito bastante útil em eletrônica: o teorema de Thevenin (GONZALEZ, 1999) como ferramenta de análise.

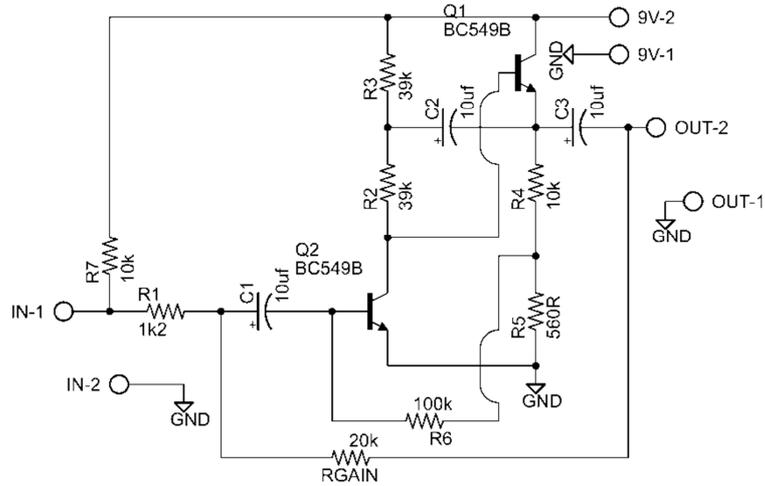


Fig. 25 – Circuito do pré-amplificador.

O teorema de Thevenin afirma que, não importando o quão complexo seja um circuito eletrônico, a sua função pode ser entendida em primeira instância usando-se apenas resistências e fontes de tensão. Um exemplo do cotidiano deste teorema é a indicação em certos aparelhos eletrônicos da impedância de entrada, por exemplo, em aparelhos de recepção via satélite e cabos coaxiais para rádio frequência. Não importando quão complexa seja a estrutura interna do aparelho, ela pode ser entendida como um resistor de uma dada impedância ligada à fonte de alimentação externa ao aparelho (Fig. 26).

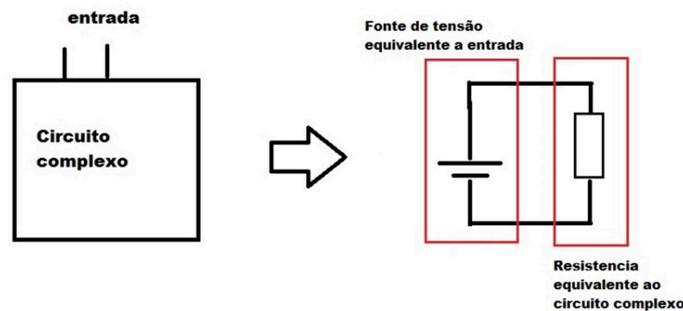


Fig. 26 – Equivalente de Thevenin de um circuito. Se o circuito possui uma entrada ela pode ser entendida como uma fonte de tensão arbitrária, enquanto todo o circuito interno se comporta como uma resistência cuja tensão de entrada é aplicada e produz como efeito uma corrente elétrica, corrente está que percorre o dispositivo como um todo.

A resistência equivalente de Thevenin nos permite obtermos informações básicas de um circuito complexo quanto ao consumo de corrente elétrica, potência entre outras características. O circuito se comportará de tal maneira que a corrente que atravessa o aparelho é dada pela aplicação da lei de Ohm usando como resistência o valor da impedância do equivalente de Thevenin (Eq. 1). A impedância por sua vez é definida pela Eq. 2 e nada mais é do que a generalização da resistência elétrica quando temos fontes de tensão alternadas bem co-

mo elementos reativos (capacitores e indutores) presentes no circuito, pois estes dispositivos se comportam fisicamente como resistores em presença de tensão alternada com determinada frequência aplicada em seus terminais.

$$U = Z \cdot I \quad (1)$$

Em que U é a tensão alternada aplicada ao dispositivo em Volts, Z é a impedância de entrada em Ohms e I é a corrente que percorrerá o dispositivo em Amperes.

$$Z = \sqrt{R^2 + (1/2\pi fC)^2 + (2\pi fL)^2} \quad (2)$$

Em que Z é a impedância total em Ohms, R é a resistência fixa total no circuito em Ohms, C é a capacitância total em Farads, L é a indutância total em Henries e f é a frequência da tensão alternada aplicada em Hertz. Os termos em parênteses são a reatância capacitiva e indutiva, respectivamente.

Aplicaremos o conceito de equivalente de Thevenin ao circuito da Fig. 27, esta consiste na primeira etapa de nossa análise. O microfone de eletreto pode ser entendido como um resistor (R_m) cuja a impedância varia em função da onda sonora incidente no mesmo. Sabemos que a estrutura interna do microfone pode ser complexa, incluindo outros dispositivos²², porém seu comportamento global pode ser descrito pelo equivalente de Thevenin. Os resistores R_7 e R_m formam um divisor de tensão, isto é, a tensão que aparece na junção destas resistências é dada pela tensão de alimentação V_{CC} multiplicada por um fator cujo valor depende das resistências R_7 e R_m . Aplicando a lei de Ohm a estes resistores, temos:

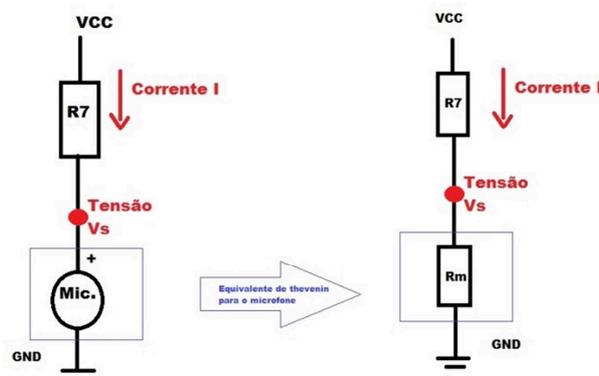


Fig. 27 – Circuito equivalente de entrada. V_s se comporta como uma fonte de tensão que transporta informação sonora, sua variação no tempo está relacionado à vibração das ondas sonoras. R_m representa o microfone, visto que este dispositivo converte informação sonora em resistência (impedância) elétrica. A corrente I é aquela que “alimenta” o microfone, isto é, fornecer energia para que o dispositivo possa operar.

$$I = \frac{V_{CC}}{(R_7 + R_m)}$$

²² Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/ideias-dicas-e-informacoes-uteis/49-tiristores/684-microfone-de-eletreto-ip074>>. Acesso em: 16 mai. 2016.

$$V_s = R_m I = V_{CC} \frac{R_m}{(R_7 + R_m)} \quad (3)$$

Desta forma, a tensão de saída V_s varia de acordo com a impedância do microfone. A esta tensão V_s é o que chamamos de sinal elétrico correspondente ao som, sua variação está diretamente ligada a informação sonora captada pelo microfone. Devemos reparar que na dedução da Eq. 3 supomos que a corrente I é aquela que circula apenas sobre os resistores R_7 e R_m , isto é, não existe nenhum nó de corrente na junção destes resistores, isso significa que, por exemplo, ao medirmos a tensão V_s com um multímetro supomos que a corrente que este “empresta” (I_s) do nó R_7 e R_m para aferir a tensão é muito menor que I ou, no caso ideal, nula. Podemos usar novamente o conceito de equivalente de Thevenin para entender a natureza do sinal elétrico (V_s) neste exemplo: aplicando o teorema sobre o circuito de entrada (Fig. 3), obtemos que o sinal elétrico correspondente ao som (tensão V_s) se comporta como um fonte de tensão em série com um resistor de impedância (resistência) muito elevada, pois esta fonte de tensão pode fornecer uma corrente muito pequena (idealmente ela deve ser nula), isto é análogo a uma resistência elevada em série com uma fonte de tensão qualquer (por exemplo, uma pilha de 1,5V em série com resistor de $1M\Omega$), pois o efeito ao se medir a tensão e a corrente máxima da fonte deve ser o mesmo (Fig. 28).

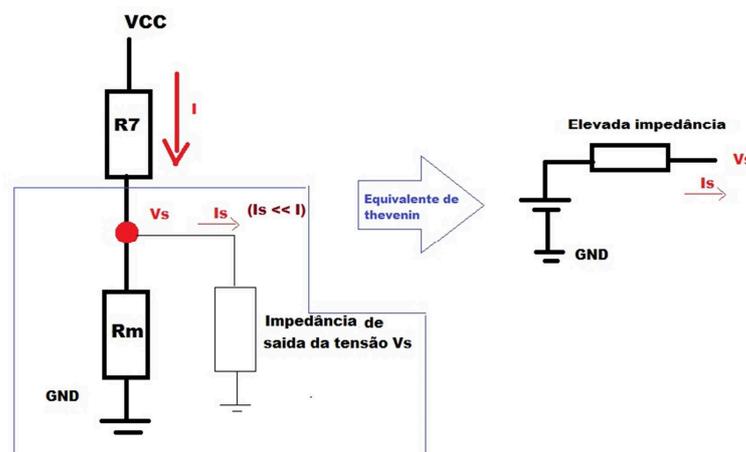


Fig. 28 – Equivalente de Thevenin para V_s (à direita). A corrente I_s no nó entre R_7 e R_m deve ser muito menor que I , caso liguemos alguma carga neste nó, isto é, alguma resistência entre o nó e o terra (GND), esta corrente deve ser mínima. A esquerda temos o equivalente de Thevenin para a fonte de tensão V_s , esta fonte equivalente obtida pelo teorema possui comportamento análogo ao circuito a direita.

Devido à natureza equivalente de V_s ser de uma fonte de tensão em série com uma impedância muito elevada, dizemos que o sinal elétrico nesta etapa possui uma elevada impedância. De forma análoga, se fizermos uma análise do equivalente de Thevenin da impedância de entrada do circuito de gravação, devemos encontrar uma resistência cuja impedância é razoavelmente pequena (o valor comercial fica em torno de $1k\Omega$ a $100k\Omega$) portanto, diz-

se que o circuito pré-amplificador proposto neste trabalho é um ‘casador’ de impedância, pois atua de forma a reduzir a alta impedância de saída do microfone de eletreto (fonte V_s) até que ela se ajuste a baixa impedância de entrada do gravador.

A segunda etapa de nossa análise consiste na conversão do sinal elétrico de tal forma que ele se ajuste a etapa de amplificação. Para realizar o casamento de impedância, necessitamos de um dispositivo que amplifique a pequena corrente que podemos retirar da fonte de sinal V_s , o dispositivo que possibilitará esta amplificação é o transistor cujo os terminais são mostrados na Fig. 29. Fornecendo tensões corretas nos terminais Base, Coletor e Emissor o transistor é capaz de amplificar sinais elétricos de baixa intensidade. O ato de fornecer tensões apropriadas utilizando resistores chama-se polarização do transistor e é uma etapa fundamental para o bom funcionamento do circuito de amplificação. Existem ainda diversas formas de proceder no cálculo dos resistores que atuarão na polarização do transistor, diversos modos de operação e simplificações possíveis a fim de tornar mais fácil este cálculo (SILVA, 1999). Apresentaremos aqui uma versão simplificada e intuitiva destes cálculos, focando no entendimento básico do funcionamento do circuito.

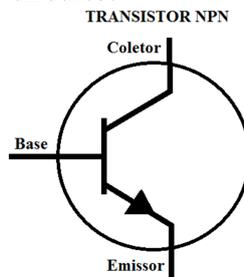


Fig. 29 – Simbologia e pinagem de um transistor comum. Existem diversos tipos de transistores no mercado, este tipo utilizado por nós é dito como bipolar comum, apresenta três pinos distintos e opera com sinais de baixa intensidade.

O sinal elétrico da fonte V_s possui a característica da Fig. 30, este comportamento surge considerando que a resistência R_m (impedância do microfone) pode variar com valores típicos na faixa de 9-10kohm²³. Por outro lado, a equação que rege a corrente de coletor-emissor – isto é, sua saída – em um transistor em função da tensão na base – entrada (BRAGA, 2004) é:

$$I_c = I_s \cdot e^{\frac{V_{be}}{V_t}} \quad (4)$$

²³ Lembramos que o microfone atual como um dispositivo que converte a informação das ondas sonoras em resistência (impedância) elétrica.

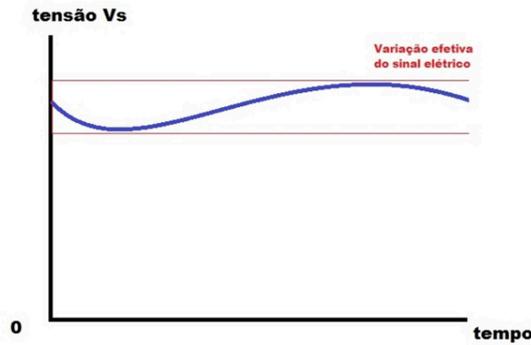


Fig. 30 – Comportamento da tensão V_s . A tensão V_s oscila, isto é, transporta informação sonora, em um pequeno intervalo localizado acima do eixo das abscissas. A tensão constante que deslocou este intervalo verticalmente é usada para alimentar o microfone, ela produzirá uma corrente que percorre o dispositivo (I) para que o mesmo possa converter a informação sonora em resistência elétrica.

Na relação da Eq. 4, I_c é a corrente que aparece no coletor de transistor, I_s é a corrente de saturação reversa (constante característica do componente), V_t é a tensão de deriva térmica (da ordem de 20mV em temperatura ambiente) e V_{be} é a tensão entre a base e o emissor. Portanto notamos que, ao aplicar o sinal elétrico na base do transistor, a corrente do coletor I_c varia correspondentemente a este sinal por um fator exponencial, isto representa um problema, pois boa parte do sinal V_s contribuirá de forma a gerar uma corrente excessiva no coletor do transistor sem carregar informação sonora, possivelmente danificando o componente. Com efeito, devemos extrair de V_s apenas a variação do sinal, retirando a tensão constante adicionada (que serve para alimentar o microfone). Este objetivo pode ser alcançado usando-se um capacitor (C_1) que deixará passar apenas a variação correspondente do sinal elétrico. A equação que rege o comportamento de um capacitor é:

$$V = \frac{Q}{C}$$

Ou ainda:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dQ}{dt} = C^{-1} I \quad (5)$$

Onde C é o valor da capacitância do capacitor. Temos desta forma um sinal elétrico na forma de uma corrente alternada (I) que transporta a informação sonora da fonte de tensão V_s . Esta corrente responde apenas a variação da tensão V_s , mantendo as informações carregadas por essa tensão, isto é, a variação do sinal elétrico. A Eq. 5 também mostra que a tensão constante usada para alimentar o microfone não influenciará o sinal elétrico de saída (agora este sinal elétrico é a corrente I), por este motivo diz-se que o capacitor “isola” a tensão DC (contínua) do sinal elétrico. Lembramos ainda que o capacitor neste caso se comporta como um resistor, visto a natureza dinâmica do sinal elétrico V_s . Portanto, a “resistência” oferecida pelo capacitor e que dá origem a corrente I varia conforme a frequência, pois a reatância ca-

pacitiva é uma função desta (vide Eq.2). De forma a limitar uma resistência mínima para que a corrente I (relacionada a corrente I_s na etapa anterior) drenada da fonte V_s não perturbe o funcionamento da etapa de conversão de som em sinal elétrico, adiciona-se um resistor fixo (R_1) que limita a corrente máxima do sinal elétrico I .

Enfrentamos um segundo problema: o sinal elétrico (corrente I) possui natureza alternada, isto é, AC, porém o transistor opera somente com sinais DC (corrente ou tensão contínuas). Podemos ver o comportamento da corrente I no gráfico da Fig. 31. Observa-se que a corrente possui um componente negativo que não será amplificado pelo transistor. Existe a necessidade de operar o sinal elétrico de forma que a parte negativa seja amplificada pelo transistor, caso contrário estamos perdendo informação sonora. Para fazer isso, somamos uma pequena corrente constante a I de forma transladar verticalmente a sua componente negativa ao quadrante positivo.

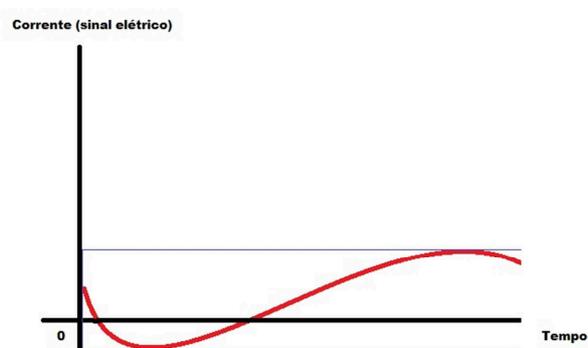


Fig. 31 – Comportamento do sinal elétrico I . A informação sonora está contida numa corrente I que pode adquirir valores negativos ou positivos, isto é, seu sentido pode variar de acordo com a informação transportada.

Para adicionar essa corrente constante ao sinal, usamos uma malha de resistores na forma de divisor de tensão (R_4 , R_5 e R_6). Os resistores R_4 e R_5 produzem uma tensão em sua junção que é calculada usando uma relação semelhante a Eq. 3, essa tensão é então aplicada ao resistor R_6 que determinará a corrente constante a ser somada ao sinal elétrico na base do transistor Q_2 . O valor típico desta corrente constante é extremamente baixo (pois o sinal elétrico é muito pequeno), podemos observar pelos valores das resistências envolvidas. Normalmente este valor de corrente é determinado experimentalmente com auxílio de um osciloscópio e um gerador de sinais – a determinação analítica dos valores das resistências R_5 , R_4 e R_6 envolve muita álgebra. Rotineiramente uma boa escolha destes valores está mais para arte do que ciência exata (BRAGA, 2004).

Passemos a analisar o 3º bloco do circuito, formado pela etapa de amplificação. O sinal elétrico devidamente injetado no terminal base do transistor Q_2 faz surgir uma corrente amplificada em seu coletor dado pela Eq. 6. Nela, o fator de amplificação (β) é uma característica do transistor e geralmente está na faixa de 20 a 40 para transistores bipolares de baixa potência (BC549). A corrente de coletor por sua vez dá origem a uma queda de tensão corres-

pendente nos resistores R2 e R3, essa tensão contém a informação do sinal elétrica determinada por β e os valores destes resistores. Escolhe-se o valor de R2 e R3 de modo que a sua soma resulte a uma queda de tensão menor que a tensão de alimentação VCC, caso contrário ocorre a saturação da etapa amplificadora no transistor Q2, isto é, impossibilitado de aumentar a queda de tensão sobre os resistores o transistor distorcerá o sinal conforme a Fig. 32.

$$I_c = \beta I_b \quad (6)$$

Com efeito, o valor de R2 + R3 deve satisfazer:

$$V_{cc} > (R_2 + R_3) I_c = (R_2 + R_3) \beta I_b$$

Isto é:

$$R_2 + R_3 < \frac{V_{cc}}{\beta I_b} \quad (7)$$



Fig. 32 – Distorção do sinal elétrico devido a escolha de R2 e R3. Quanto maior é o valor de R2 + R3 o sinal elétrico (em magenta) se desloca no sentido positivo das abscissas, ao cruzar a reta que limita a tensão de alimentação VCC (em azul) o transistor não pode amplificar o sinal, e este é descartado pelo mesmo ocasionando perda de informação sonora, este efeito é conhecido como distorção por saturação de entrada.

Novamente, uma boa escolha dos valores dos resistores pode ser obtida experimentalmente usando um gerador de sinais e um osciloscópio, acompanhando a distorção do sinal amplificado no mesmo. Pode-se, ainda, estimar o valor de R2 e R3 conhecendo-se a magnitude do sinal e o valor médio do fator beta do transistor a temperatura ambiente²⁴. Obtemos no terminal Coletor do transistor Q2 o sinal elétrico que transporta informação sonora na forma de tensão amplificada, porém não podemos aplicar este sinal diretamente a entrada do circuito de gravação, se o fizermos a baixa impedância irá perturbar o valor do resistor efetivo que está ligado ao coletor de Q2, isto é, teremos além das resistências R2 e R3 uma terceira resistência que corresponderá a impedância de entrada do gravador, cujo valor não sabemos com

²⁴ Disponível em: <<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/BC/BC547.pdf>>. Acesso em: 16 mai. 2016.

exatidão²⁵. Esta corrente efetiva é que deve ser considerada na Eq.6, o que implica um decréscimo na amplificação do sinal elétrico visto que devemos descontar do sinal elétrico uma corrente “parasita” multiplicada pelo fator beta. Portanto, necessitamos de um circuito que transforme o sinal elétrico presente no coletor de Q2 de forma que possua uma alta impedância de entrada, isto é, que retire do coletor de Q2 uma corrente desprezível e converta essa corrente em uma maior, capaz de excitar o circuito de baixa impedância de entrada do circuito de gravação sem interferir no ganho da etapa de amplificação – esta é a função do transistor Q1.

Portanto, o transistor Q1 atua de modo a converter o sinal elétrico em forma de tensão aplicada em sua base (conectada ao coletor de Q2) em uma corrente elétrica correspondentemente maior em seu emissor. Para entender o funcionamento, recorreremos a Eq. 5 que relaciona a tensão da base-emissor com a corrente de coletor. Faremos as seguintes aproximações: vamos supor que a corrente de coletor é igual a corrente de emissor (isto é, a corrente de base é desprezível – o que implica em alta impedância de entrada de Q1) e que o sinal elétrico aplicado a sua base não é muito intenso. Essas hipóteses são conhecidas como aproximação para pequenos sinais (SILVA, 1999), diante dela, podemos expandir com a série de Taylor o termo exponencial da Eq. 5 em relação a V_{be} , isto é:

$$I_c = I_e = I_s \left(1 + \frac{V_{be}}{2V_t} \dots \right) \quad (8)$$

Pela Eq. 8 podemos observar que a corrente no emissor de Q1 varia linearmente com o sinal de entrada, magnificada por um fator I_s (corrente de saturação reversa), dentro da aproximação de pequenos sinais. Ainda analisando a Eq. 8 e o circuito podemos ver que corrente I_e está fisicamente desacoplada da tensão de base V_{be} , isto é, podemos conectar uma impedância razoavelmente pequena no emissor e coletar o sinal elétrico (oriundo da corrente I_c) sem provocar um decréscimo no ganho de corrente, problema que ocorria na amplificação do sinal em Q2. A corrente I_e percorre os resistores R4 e R5 e gera uma queda de tensão que carrega a informação sonora, esta tensão é acoplada ao circuito gravador pelo capacitor C3, que possui função semelhante ao capacitor C1 de isolar a tensão DC que polariza o transistor Q1 do sinal elétrico.

Devemos notar que a tensão de saída (no emissor de Q1) devida a corrente I_e de Q1 influencia a polarização de Q2, este processo dinâmico é o que torna complicada a álgebra que determina a malha R4, R5 e R6. Por conta disto é comum escolher os valores destes resistores considerando os picos de tensão e correntes máximos do sinal de entrada, isto é feito, por exemplo, analisando a Eq. 6 onde devemos fazer que a desigualdade seja experimentalmente forte, isto é, que o membro esquerdo seja da ordem de vários múltiplos inteiros menores que o membro do lado direito (normalmente fazendo cinco vezes menor é o suficiente para um bom funcionamento).

²⁵ Diferentes marcas/modelos podem ter valores de impedância de entrada diferentes, visto que não existe um padrão para isto, apenas uma faixa de valores típicos. Contudo, necessitamos conhecer com exatidão o valor desta impedância ao calcular as resistências R2 e R3 levando em consideração a Eq. 7.

No circuito, temos ainda uma etapa de realimentação negativa formado resistor RGAIN, donde vem o nome deste tipo de configuração de pré-amplificador: *negative feedback amplifier* (PALUMBO; PENNISI, 2002). A realimentação negativa atua no ganho efetivo do pré-amplificador: RGAIN devolve na estrada parte do sinal da saída (que possui fase invertida) de forma a reduzir o ganho do circuito, evitando assim que uma amplificação exagerada sature a entrada do gravador causando distorção de amplitude. Quanto maior é o valor de RGAIN menor será a realimentação negativa do sinal, portanto maior será o ganho do circuito. Deve-se ajustar o ganho do pré-amplificador de modo a tornar clara a gravação do sinal sem saturar a entrada do mesmo, isto é, o ganho deve ser ajustado sem que se atinja o limite da entrada do gravador e, ao mesmo tempo, que não seja baixo a ponto de tornar o sinal gravado inaudível.

A presença de C2 no circuito atua como capacitor de *bootstrap*: sua função é reduzir a distorção harmônica do sinal de baixa frequência (por exemplo, vozes mais graves) que tendem a serem atenuadas na etapa de amplificação devido a reatância (“resistência” do capacitor) de C1. Quanto maior o valor do capacitor de *bootstrap*, menor é a atenuação do sinal correspondente aos graves e, portanto, pode-se conseguir uma qualidade de áudio melhor para esta faixa de frequência. Deve-se atentar para o fato de um exagero nos graves causar distorção no sinal, pois o excesso de graves pode saturar a entrada do gravador e gerar ruídos, que por sua vez interferem na clareza das frequências médias e agudas.