

Pontifícia Universidade Católica de São Paulo
PUC-SP

Glauco Aparecido de Campos

**Os fundamentos das investigações de Georg Simon Ohm
(1789-1854) sobre a definição de tom**

Doutorado em História da Ciência

São Paulo
2023

Pontifícia Universidade Católica de São Paulo
PUC-SP

**Os fundamentos das investigações de Georg Simon Ohm
(1789-1854) sobre a definição de tom**

Glauco Aparecido de Campos

Tese apresentada à banca examinadora da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, como exigência parcial para obtenção do título de Doutor em História da Ciência, sob orientação da Profa. Dra. Márcia H. M. Ferraz.

São Paulo

2023

BANCA EXAMINADORA

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação São Paulo (PUC).

This work was carried out with the support of Fundação São Paulo (PUC).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 – processo número 88887.198997/2018-00.

This work was carried out with the support of Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brazil (CAPES) - Funding Code 001 – process number 88887.198997/2018-00.

Autorizo a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte, para fins exclusivamente acadêmicos ou científicos.

Glauco Aparecido de Campos
glaucodecampos@ifsp.edu.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo apoio, sem o qual eu não teria conseguido realizar este e outros trabalhos. Em especial meus pais Cláudio e Lúcia, meus irmãos Gláucia e Gregório e meus sobrinhos Anthony e Richard, os quais foram privados muitas vezes de minha presença.

Aos professores e colegas do Programa de Estudos Pós-Graduados em História da Ciência e do Centro Simão Mathias de Estudos em História da Ciência (CESIMA), com quem tive uma oportunidade ímpar de aprendizado, agradeço enormemente.

À professora Ana Maria Alfonso-Goldfarb, um enorme agradecimento pelas imensuráveis contribuições para a minha formação de historiador da ciência e pelos valiosos apontamentos sobre os caminhos desta pesquisa.

Ao meu amigo e colega de doutorado Alan Daniel de Brito Mello, com quem compartilhei muitas horas de estudo, pela paciência e dedicação em ler e dar sugestões sobre este trabalho, meu muito obrigado.

E um agradecimento muito especial a minha orientadora professora Márcia Helena Mendes Ferraz, por toda a paciência, pelas críticas extremamente construtivas e por todo o inestimável aprendizado que ela me proporcionou na área de História da Ciência.

RESUMO

É conhecido que a série de Fourier foi uma importante contribuição desenvolvida e consolidada no início do século XIX e utilizada posteriormente em diversas aplicações. Contudo, os trabalhos de cunho histórico a respeito do tema geralmente não buscaram compreender como tal ferramenta, tendo sido elaborada por Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) em seus estudos sobre o calor, acabou sendo utilizada por Georg Simon Ohm (1789-1854) em sua investigação sobre a definição de tom. De fato, não há uma resposta simples para esta questão, uma vez que não há manifestações explícitas a respeito. No entanto, a observância de mudanças na forma de se fazer ciência em terras germânicas, local onde Ohm estava inserido, e sua inspiração nos trabalhos de Fourier e de outros estudiosos franceses ajuda a compreender o que teria possibilitado tal deslocamento de contexto da série em pauta. Estes trabalhos teriam contribuído para que Ohm utilizasse determinadas ferramentas matemáticas de uma forma mais abstrata do que a usual em relação aos padrões da época e do local. Tal abordagem, além de ter permitido a mudança de contexto mencionada, teria ajudado o estudioso a caminhar em direção a uma teoria unificadora na qual os tons produzidos pelos “novos” instrumentos da época – a sirene e a roda dentada – seriam considerados condizentes com a “antiga definição de tom”, oriunda dos estudos das cordas vibrantes do século XVIII¹.

Palavras- Chave:

História da acústica; série de Fourier; Georg Simon Ohm; definição de tom; harmônicos; funções senoidais.

¹ Ohm, “Über die Definition”, 518.

ABSTRACT

It is known that the Fourier series was an important contribution developed and consolidated in the early nineteenth century and used later in several applications. However, historical works on the subject have generally not sought to understand how such a tool, having been developed by Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) in his studies of heat, ended up being used by Georg Simon Ohm (1789-1854) in his investigation of the definition of tone. In fact, there is no simple answer to this question since there are no explicit statements about it. However, the observation of changes in the way of doing science in Germanic lands, where Ohm was inserted, and his inspiration in the works of Fourier and other French scholars, helps to understand what would have made possible such a change of context for the series in question. These works would have contributed for Ohm to use certain mathematical tools in a more abstract way than usual in relation to the standards of the time and place. Such an approach, besides having allowed the mentioned change of context, would have helped the scholar to move towards a unifying theory in which the tones produced by the "new" instruments of the time – the siren and the cogwheel – would be considered consistent with the "old definition of tone" coming from the eighteenth-century vibrating string studies.

Keywords:

History of acoustics; Fourier series; Georg Simon Ohm; definition of tone; harmonics; sine functions.

Sumário

Introdução.....	10
Capítulo 1. Sobre Georg Simon Ohm e a acústica	14
1.1 Um estudioso em um momento de mudanças	15
1.2 A trajetória de Ohm antes dos estudos sobre acústica	27
1.3 Os fenômenos dos tons de combinação e dos batimentos	34
Capítulo 2. As fontes	40
2.1 Os “novos” instrumentos de produção de tons	40
2.2 Fourier e a relação som/calor	50
2.3 Os experimentos de Seebeck	60
Capítulo 3. A definição de tom.....	63
3.1 O artigo de 1843	64
3.2 As funções senoidais na resposta de Seebeck.....	88
Considerações finais.....	93
Referências	97

Introdução

Diversos estudos foram realizados sobre cordas vibrantes no século XVIII, dentre os quais os de Daniel Bernoulli (1700-1782), Leonhard Euler (1707-1783), Jean le Rond d'Alembert (1717-1783) e Joseph Louis Lagrange (1736-1813). De acordo com um estudo recente, houve uma intensa disputa entre estes estudiosos acerca da função senoidal como representativa dos pequenos tons que acompanhavam o tom fundamental de uma corda vibrante.² Por fim, tal função conseguiu permanecer como um caminho plausível de explicação de tais tons, adentrando o século XIX e influenciando as pesquisas de Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) sobre a condução de calor. Nesse momento, Fourier faz uma transposição de hipóteses e métodos utilizados no contexto do som para o do calor, inclusive obtendo equações às vezes similares às aquelas encontradas nos estudos sonoros, de acordo com o artigo citado.

As cordas vibrantes, bem como os tubos nos quais o ar passava produzindo som, os quais foram objeto de discussão no século XVIII, não deixaram de ser estudados no século XIX. Porém, o instrumento que mudou a forma com que as investigações em acústica foram conduzidas foi um aparato introduzido pelo engenheiro e físico francês Charles Cagniard de la Tour (1777-1859).³ Este instrumento possuía um disco com uma sequência de furos através dos quais uma espécie de bico produzia jatos de ar, que gerava um som conforme o disco girava. A construção, que na realidade não era nova, uma vez que há registros de pelo menos mais um aparato similar produzido anteriormente, permitia que o som fosse gerado de uma forma diferente da usual da época (por cordas vibrantes ou por tubos nos quais o ar que passava produzia som). O estudioso Ludwig Friedrich Wilhelm August Seebeck (1805-1849) utilizou um aparato do tipo em diversos experimentos na tentativa de compreender melhor alguns aspectos do som.⁴

² Darrigol, “The acoustic origins”. Esses pequenos tons foram chamados pelo estudioso francês Joseph Sauveur (1653-1716) no século XVII de harmônicos, uma vez que sua quantidade de oscilação era múltipla da quantidade de oscilação do tom chamado fundamental.

³ De la Tour, “Sur la Sirène”.

⁴ Seebeck, “Ueber die Sirene”. Não confundir com Thomas Johann Seebeck (1770-1831), seu pai, conhecido por seus estudos relacionados ao efeito termoelétrico e pelo efeito Seebeck.

Outro instrumento importante foi o aparato desenvolvido por Félix Savart (1791-1841). Consistia em uma roda com dentes colocada para girar em torno de um eixo através de uma outra roda acionada por uma manivela e uma polia. Em contato com os dentes da roda, era colocado uma espécie de cartão, cujo atrito com os dentes da roda girando produzia um som de uma determinada altura. O instrumento, que não era totalmente novo, havia sido construído na busca de se investigar os limites da audição humana em relação às frequências.⁵ Ambos os instrumentos (o aparato de Cagniard e Seebeck e o de Savart) iriam contribuir decisivamente para estudos posteriores em acústica.

A utilização destes instrumentos em investigações sobre o som colocou em xeque a tradição da função senoidal como um paradigma descritivo de um tom e de seus harmônicos. Isso porque havia uma dúvida se estes instrumentos produziam tons de mesma natureza que os produzidos pelas cordas, tubos etc. Estas últimas formas de geração de som estavam associadas a movimentos pendulares, os quais estariam por sua vez ligados às funções senoidais. Poder-se-ia dizer que essas “novas” formas de produção de som se enquadrariam na “antiga definição de tom”, ou seja, se seus tons também obedeceriam a uma lei senoidal? Essa é a pergunta que o estudioso bávaro Georg Simon Ohm (1789-1854) irá buscar responder em seu artigo publicado em 1843. O trabalho é realizado em resposta às investigações de Seebeck sobre alguns aspectos sonoros utilizando sua sirene. Para tal, Ohm serve-se de um resultado obtido por Fourier em suas investigações sobre o calor, formalizado em 1822.

Novamente há uma transposição de áreas, agora realizada por Ohm, fazendo com que as funções senoidais retornassem ao seu lugar tradicional dos estudos sobre o som. O objetivo da presente pesquisa é investigar o que teria possibilitado e motivado o estudioso a fazer esta transposição. Em outras palavras, em que bases ele se apoiou para executá-la.

Para tal realização, buscou-se levantar e analisar o material relacionado ao objeto de pesquisa, incluindo os trabalhos do estudioso, suas fontes, trechos de cartas, literatura secundária e sobre o contexto. No entanto, à medida que o trabalho foi avançando, novos materiais foram sendo incorporados a este levantamento inicial e ajustes foram realizados no objeto e na hipótese previamente adotada. As análises foram realizadas levando-se em consideração três esferas: a epistemológica, ou seja, relacionada ao conteúdo dos trabalhos dos estudiosos em si, a historiográfica, associada aos critérios utilizados por outros pesquisadores

⁵ Ullmann, *Chladni und die Entwicklung*, 169. O artigo de Savart em que ele publicou os resultados aqui referidos é Savart, “Note sur la sensibilité de l’organe de l’oïue”.

para escreverem trabalhos sobre o objeto delimitado, e a contextual, relacionada aos contextos (próximo e geral) que circundam o objeto de investigação.⁶

O *corpus* documental da pesquisa constitui-se essencialmente pelos três trabalhos acústicos de Ohm, em especial o segundo (1843), a introdução de seu livro sobre a corrente galvânica (1827) e o pedido de Ohm ao ministério responsável pela administração das aulas para seu afastamento, em 1826. Foi utilizada uma combinação da literatura secundária com algumas obras originais de diversos estudiosos, além da tradução para o inglês do trabalho de 1822 de Fourier sobre o calor. Obras sobre a história da acústica e da física em geral, bem como sobre instituições e biográficas auxiliaram a compreender um pouco mais sobre o contexto próximo dos estudos de Ohm. Estas últimas também auxiliaram na investigação do percurso trilhado pelo estudioso e a localizar alguns embates relevantes para esta pesquisa. Obras sobre a história germânica, por sua vez, auxiliaram a compreensão de um contexto mais geral.

A partir de uma revisão bibliográfica, constatou-se que não existem muitos trabalhos na literatura que abordaram especificamente as pesquisas de Ohm em acústica, até o momento da elaboração desta pesquisa. Há a importante contribuição de Roy S. Turner, que abordou a disputa Ohm-Seebeck e as bases para a acústica fisiológica de Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894), o trabalho de Stephan Vogel, numa direção mais ou menos similar, o de Dietrich Ulmann, que tratou da questão do timbre nesses trabalhos e a recente contribuição de Melle J. Kromhout, que buscou investigar o trabalho acústico de Ohm em seus próprios termos.⁷ No entanto, buscou-se, nesta pesquisa, desenvolver alguns pontos importantes os quais acredita-se não terem sido abordados nestes trabalhos, ou tratados de modo insuficiente, visando uma melhor compreensão do que teria possibilitado a utilização da série senoidal por Ohm para analisar a definição de um tom.

Diferentemente dos trabalhos baseados em visões historiográficas mais tradicionais, nesta pesquisa não se pretende tratar a teoria de Ohm como um fato isolado ou como pura consequência da genialidade do estudioso. Embora não se negue essa genialidade, pretende-se mostrar que seus trabalhos também foram produto de um processo que se desenrolou na primeira metade do século XIX, num determinado contexto de modificações sobre o que se considerava ciência à época. É importante se considerar as mudanças institucionais, a visita de

⁶ Ferraz, “Reflexões sobre a constituição”, 45; Alfonso-Goldfarb, “2. Centenário Simão Mathias”, 7-8.

⁷ Turner, “The Ohm-Seebeck dispute”; Vogel, “Sensation of tone”; Ulmann, “Ohm-Seebeck-Helmholtz”; Kromhout, “The unmusical ear”.

Ohm aos trabalhos de Fourier e de outros estudiosos, o aparecimento dos estudos dos instrumentos não usuais de produção sonora, tudo dentro do contexto das pesquisas sobre o som no período investigado.

No entanto, indo na direção do pensamento do historiador Paul Veyne, entende-se que nenhuma narrativa que se pretende construir esgotará todas as possibilidades sobre os acontecimentos, pois apesar destes serem objetivos, a trama que se escolhe produzir baseando-se nestes acontecimentos não o é, embora ela tenha de estar vinculada a eles.⁸ Por este motivo, buscar-se-á realizar a narrativa mais completa possível no que se refere ao objeto estudado, sempre com o apoio dos documentos e dos trabalhos já realizados sobre o tema.

Um documento, como bem nos lembram as historiadoras da ciência Alfonso-Goldfarb et al, é um constructo, que só se transforma em um documento de fato dentro de um marco conceitual.⁹ Desta maneira, não faria sentido serem analisados os trabalhos acústicos de Ohm sem levar em consideração o contexto em que eles estão inseridos e sem tratar de suas fontes, ou seja, dos outros documentos que forneceram ideias para a formulação destes trabalhos sobre o som. Sustentam as autoras que:

[...] nenhum documento é inteiramente contido ou evidente em si mesmo. Atrás de sua aparente unicidade, em geral, existe algum tipo de fissura através da qual se comunicou, ou ainda se comunica, com documentos anteriores que, transformados em suas fontes, lhe emprestam um movimento temporal.

Desta forma, através do diálogo entre fontes e documentos ganha corpo uma espécie de duto temporal capaz de exhibir o que ficou, o que desapareceu ou se transformou nos processos e caminhos históricos do conhecimento.¹⁰

E construir este duto temporal é um dos objetivos deste trabalho ao se abordar os trabalhos do autor estudado à luz de suas fontes.

A pesquisa está dividida em três capítulos. O primeiro busca traçar o percurso de Ohm em relação à sua formação e sua atuação acadêmica até o momento em que o estudioso começa a investigar a área da acústica. A preocupação, neste ponto, não é com a completude da

⁸ Veyne, *Como se escreve a história*, 41-49.

⁹ Alfonso-Goldfarb et al, “Uma ,viagem’ entre documentos e fontes”, vi.

¹⁰ *Ibid.*, vii.

descrição deste percurso, mas sim com o que é relevante para o objeto desta pesquisa. Ademais, o contexto germânico será abordado na medida em que influencia o percurso de Ohm e contribui para o direcionamento de suas ideias. Este capítulo é baseado principalmente em trabalhos biográficos e sobre os contextos (particular e geral) envolvidos.

O segundo capítulo é baseado nas fontes do artigo de Ohm, a saber, trabalhos produzidos por Cagniard e Savart sobre a sirene e a roda dentada, os de Fourier sobre o som e o de Seebeck sobre a sirene. Mais precisamente, a intenção é compreender qual o impacto da utilização destes instrumentos de produção de som nos estudos sobre o som da época, bem como analisar como Fourier relacionava som e calor, uma vez que ele e os estudiosos franceses em geral foram inspiradores do trabalho de Ohm. Este é um ponto importante para se compreender os trabalhos do estudioso, em particular os acústicos, foco desta pesquisa.

Por fim, no último capítulo, pretende-se abordar propriamente as principais ideias do artigo de 1843, bem como analisá-lo à luz dos capítulos anteriores. Nesta análise, buscar-se-á explicar as bases para a utilização da série senoidal por Ohm para investigar os tons produzidos pela sirene de Seebeck. Os pontos principais abordados serão: a defesa realizada por Ohm de uma tradição estabelecida com base nos estudos das cordas vibrantes do século XVIII, a busca do estudioso por leis gerais e simples, muitas vezes conectando áreas e indo em direção a teorias mais unificadoras, e a influência de Fourier, de modo mais específico, e de estudiosos franceses, de modo mais geral, que trouxe a possibilidade de uma utilização diferenciada da matemática por Ohm em relação ao que se praticava no contexto da ciência germânica da época.

Capítulo 1. Sobre Georg Simon Ohm e a acústica

Neste primeiro capítulo, tratar-se-á do contexto no qual se insere o segundo artigo acústico de Ohm, bem como a parte do percurso do estudioso antes de ingressar na área da acústica que está relacionada a esta pesquisa, além de seus estudos iniciais sobre o som. Tratar o contexto é crucial para entender as ideias que circulavam, o que é importante para situar as de Ohm e assim, melhor compreendê-las. Já seu percurso mostra qual sua formação e, portanto, como foi construindo suas ideias, bem como seus embates com personalidades com ideias

conflitantes com as suas. Por outro lado, seus estudos iniciais sobre o som mostram como o estudioso começou a pensar na questão da definição de um tom e assim realizar o trabalho que é o centro de interesse da presente pesquisa.

1.1 Um estudioso em um momento de mudanças

O século XIX foi um período de muitas mudanças dentro das terras germânicas. Talvez a mais visível seja o fato de que, no início do século, essas terras compreendiam um mosaico de pequenos estados com características bastante distintas entre si, os quais no fim do século já compunham uma nação unificada. Uma pergunta natural a ser feita pelos historiadores é: o que teria possibilitado tal mudança em tão pouco tempo? De acordo com a historiadora da ciência Silvia Waisse-Priven, os pesquisadores da área buscam responder essa pergunta com base na ideia da formação do Estado moderno.¹¹ Nesse processo de formação, mudanças em diversas esferas (econômicas, sociais, religiosas etc.) acabaram ocorrendo. Essas mudanças, por sua vez, impactaram e foram impactadas pelas mudanças nas áreas da educação, da ciência e da tecnologia. E sendo Ohm um professor e pesquisador, não estaria alheio a todas estas alterações, as quais compreendem também as formas de se fazer pesquisa na área ainda não institucionalizada da física, na qual construiu sua carreira de pesquisador.

O período em que Ohm realizou seus primeiros estudos formais até o momento em que os completaria na Universidade de Erlangen foi bastante turbulento. Devido às guerras napoleônicas, a cidade natal do estudioso pertenceu, neste curto espaço de tempo, a três estados diferentes. Antes de que Ohm cursasse o ginásio, Erlangen pertencia à Francônia. Durante o ginásio, a cidade pertencia à Prússia e no momento de sua graduação na universidade, pertencia à Baviera.¹² Somente após a derrota de Napoleão em 1813 na batalha de Leipzig e o Congresso de Viena em 1815, a situação política e econômica começou a se estabilizar na região. Todavia, como seria de se esperar após todo este período de turbulência, havia um longo caminho a ser percorrido para que essa estabilização se concretizasse de fato.

¹¹ Waisse-Priven, *d&D*, 57.

¹² Jungnickel, *Intellectual mastery*, 3.

Nesse contexto, a Prússia, embora tivesse emergido como a grande vencedora após o Congresso de Viena, havia sofrido muito com o impacto das guerras e, de um modo geral, necessitava se reerguer.¹³ Houve um movimento neste sentido, tendo duas personalidades responsáveis pela reconstrução do serviço militar e do Estado, enquanto Wilhelm von Humboldt (1767-1835) estava a cargo de reformar a educação. W. von Humboldt havia sido educado em Berlim durante o “Iluminismo” e sido iniciado nos conhecimentos da antiguidade clássica. Essas e outras ideias contribuiriam para embasar a reforma educacional prussiana de forma bastante relevante, o que impactaria a forma de se enxergar e se fazer ciência na época. Embora haja autores que reconheçam que o pensamento neo-humanista mais ortodoxo não valorizasse tanto as ciências naturais, o hábito de um pensamento abstrato, formal e ordenado teria sido o aspecto central desta corrente de pensamento.¹⁴

À época investigada, não havia propriamente uma disciplina de física bem delimitada, institucionalmente falando. Nesse sentido, a física da época consistia em dois elementos: uma matéria elementar ensinada nas escolas secundárias e nas universidades como parte de uma formação mais geral e um campo de pesquisa no qual pessoas com recursos próprios pudessem atuar equipando e mantendo seus próprios laboratórios.¹⁵

Nas escolas secundárias, as ciências naturais estavam presentes tanto nos currículos das escolas clássicas (*Gymnasium*) quanto nas semi-clássicas (*Real-Gymnasium*) e não clássicas (*Realschulen*).¹⁶ Nos três casos, elas faziam parte de uma formação geral, completa, que refletia um espírito forte da época. A diferença é que no primeiro caso, o interesse era fornecer uma

¹³ Embora a Prússia tivesse emergido vitoriosa, a Áustria, com o apoio da Inglaterra, teria limitado a influência da Rússia na Europa e da Prússia em terras germânicas, mostrando sua força política. Este poder de influência de ambos os estados refletia suas extensões territoriais, as maiores da região após o congresso. Cf. Kitchen, *História da Alemanha Moderna*, 51-52.

¹⁴ Boria, “Education and research”, 162.

¹⁵ Jungnickel, 2. Da compilação *Repertorium der Physik*, editada por Heinrich Wilhelm Dove (1803-1879) e Ludwig Moser (1805-1880), pode-se apreender que a física da época estudava temas como galvanismo, eletricidade, magnetismo, ótica, acústica, meteorologia, calor, mecânica, dentre outros.

¹⁶ A *Realschule* era um dos três tipos de escola de nível secundário germânicos da época; fornecia uma formação geral, não abrangendo as línguas clássicas (grego e latim). O prefixo *Real-* está associado ao ensino “realista”, composto pela matemática, pelas ciências naturais, pela história e pela religião, em oposição ao ensino linguístico e literário composto pelos estudos clássicos e pelo alemão. Um outro tipo era o *Gymnasium*, que buscava uma formação mais completa, incluindo os estudos clássicos, além de fornecer acesso às universidades. E por fim, num “meio-termo”, havia o *Real-Gymnasium*, que ensinava latim (mas não grego), além do conteúdo trabalhado na *Realschule*, mas que também não fornecia acesso às universidades. Cf. Paulsen, *German Education*, xii-xiv e 197-220.

base para o ingresso em uma universidade, ao passo que no último, a ideia era propiciar a formação para atividades mais práticas.¹⁷

No caso das universidades, as ciências naturais eram lecionadas na Faculdade de Filosofia e serviam de base para a medicina. A história e a filologia lecionados nesta faculdade, por outro lado, serviam de base para a teologia e o direito. Deste modo, tal instituição tinha como objetivo fornecer conhecimento básico para os principais cursos da época. No entanto, por conta da reforma do ensino germânico, ela pouco a pouco foi se tornando a “faculdade científica por excelência”.¹⁸ Mas, enquanto isso não ocorria, os estudiosos da física que não conseguiam algum posto universitário e não possuíam recursos para obterem seus próprios instrumentos vinculavam-se também a escolas para realizar suas pesquisas. Esse foi o caso de Ohm, que atuou na maior parte de sua carreira em escolas e somente conseguiu um posto universitário próximo ao final de sua vida. O estudioso, nascido em uma família humilde, não tinha recursos próprios para custear os aparatos que necessitava para suas pesquisas, de modo que precisava de algum local que os fornecesse. No entanto, a situação de Ohm não era excepcional. A carreira do estudioso não destoava em geral das carreiras de seus contemporâneos e sua experiência refletia as condições de pesquisa da época.¹⁹

Nas universidades, a reforma educacional prussiana estava ancorada nos estudos clássicos e na busca pela pesquisa original, como é o caso exemplar da Universidade de Berlim. Em contraposição à França do fim do período napoleônico, na qual os professores universitários tinham um foco maior no ensino, na Prússia o ensino estava em segundo, pois se considerava que um acadêmico que se distinguia em alguma área do conhecimento, automaticamente deveria ser um bom professor.²⁰ De acordo com W. von Humboldt, a faculdade de filosofia ofereceria ao estudante a oportunidade de dedicar-se um período exclusivamente à contemplação científica, fornecendo uma base para que ele compreendesse a unidade do conhecimento.²¹ Essa busca pela criação de um ambiente propício à pesquisa, no entanto, não ocorreu de forma imediata. Demorou um longo tempo até que a função de formar pesquisadores tivesse ganhado a mesma importância de que a função já estabelecida da universidade, a saber,

¹⁷ Paulsen, 200-201 e 212.

¹⁸ Ibid., 188-90; Jungnickel, 3-4.

¹⁹ Ibid., 2.

²⁰ Paulsen, 185-86. O autor afirma que em 1808, Napoleão teria reorganizado as universidades francesas de modo a seguir o princípio mencionado.

²¹ Jungnickel, 4.

a de formar médicos, advogados, oficiais do governo, clérigos e professores (sendo esses últimos muitas vezes os mesmos).²²

Uma mudança deste tipo pode ser vista na Escola Politécnica de Nuremberg, quando o comerciante Johannes Scharrer (1785-1844), em 1834, pede a desistência do cargo de *Rektor* (diretor) e indica Ohm para a condução da instituição.²³ Scharrer, um homem prático, havia sido uma figura importante no processo de fundação da instituição, além de ter tido papel importante na construção da primeira ferrovia germânica, a qual ligava Nuremberg à Fürth. Ele tornou-se reitor da instituição posteriormente, estando neste cargo quando Ohm passou a integrar o corpo docente.²⁴ O biógrafo e sobrinho-neto de Ohm Christian von Füchtbauer afirma que Scharrer não estava satisfeito com o rumo que as escolas politécnicas estavam tomando conforme elas foram adquirindo grande ênfase na educação científica.²⁵ Embora seu pedido de demissão não tenha sido imediatamente aceito, sua permanência na condução administrativa da escola estava fadada a chegar ao fim em breve, uma vez que Scharrer era um homem de negócios e aparentemente pragmático ao ponto de não se compatibilizar com o ideal de pesquisa propagada pela reforma. Aparentemente, o choque que estava havendo seria entre um representante de uma tendência mais utilitarista, a qual enfatizava a utilidade prática do conhecimento e outra neo-humanista, com fortes raízes no projeto de identidade cultural alemã, defendendo que o conhecimento deveria auxiliar o desenvolvimento máximo das potencialidades da nação e do indivíduo²⁶. Este caso da desistência de Scharrer do cargo de diretor da Escola Politécnica de Nuremberg será retomado mais adiante, uma vez que aquele que assume tal cargo é o estudioso central desta tese.

O caso da Escola Politécnica de Nuremberg não ocorreu isoladamente. As escolas, ao lado das universidades, contribuíram de modo considerável para a ciência da época. Isso porque, mesmo antes da reforma, vários pesquisadores tinham vínculo com tais instituições. Nesta situação, podem ser citados, especificamente dentre aqueles que se dedicaram ao campo dos estudos do som, Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) e seu irmão Ernst Heinrich Weber

²² Ibid., 3-4.

²³ As escolas politécnicas, inspiradas no modelo da *École Polytechnique* de Paris, eram escolas preparatórias para futuros engenheiros, comerciantes e outras profissões e ensinavam os mesmos conhecimentos e habilidades que sua inspiração francesa. Em terras germânicas, as *Polytechnische Schule* tiveram sua origem nas *Realschulen* e nos *Realinstitute*. Sobre as *Realschulen*, ver nota 16. Os *Realinstitute* (1809/1816) serviam de preparação (*Vorschule*) para futuros engenheiros, comerciantes e outras profissões. Cf. Deuerlein, *Höhere technische*, 4, 7.

²⁴ Deuerlein, *Georg Simon Ohm*, 16 e Deuerlein, *Höhere technische*, 4, 9.

²⁵ Von Füchtbauer, *Georg Simon Ohm*, 209.

²⁶ Waisse-Priven, 75-76. Para um maior desenvolvimento dessa questão, cf. Waisse-Priven, 78-84.

(1795-1878), Friedrich Strehlke (1797-1886), August Roeber (fl. 1839-1853) e Seebeck, além do próprio Ohm.²⁷ Em geral, os estudiosos moviam-se entre essas instituições, em ambas as direções. Durante a primeira metade do século XIX, vinte e cinco professores de física em universidades germânicas lecionaram em escolas durante suas carreiras. Dez professores universitários de física simultaneamente lecionavam em escolas militares (Ohm chegou a lecionar em uma, inclusive, embora como emprego único) e nove passaram de escolas de comércio e técnicas para seus postos universitários. As escolas e as faculdades de filosofia acabavam tendo tarefas similares em relação à educação científica de seus estudantes.²⁸ Inclusive a fase mais fértil de Ohm, em termos de produção de pesquisas, é justamente o período no qual ele leciona em um *Gymnasium* jesuíta em Colônia (1817-1826). Esta escola forneceu o aparato que o estudioso precisava para desenvolver pesquisas sobre a corrente galvânica.

As mudanças mencionadas produziram, pouco a pouco, alterações nas formas mais hegemônicas de se enxergar e se produzir ciência. Mas, é importante que se faça a ressalva de que todas estas transformações não ocorreram sem alguns embates. Nem todos tinham a mesma visão que acompanhou a reforma educacional cujo grande expoente foi W. von Humboldt. Havia também adeptos da *Naturphilosophie*, uma corrente de pensamento anteriormente estabelecida que defendia uma ideia de ciência diferente daquela propagada pela reforma. Uma das principais contribuições da corrente é o fato de ela ter feito a ciência germânica desvincular em alguma medida a atividade científica de sua aplicação prática utilitária.²⁹ Há também quem considere que a importante contribuição da *Naturphilosophie* foi em relação à ampliação do campo de exploração, levando seus aderentes a áreas impensáveis em termos mecanicistas.³⁰ Em relação ao objeto da presente pesquisa, um ponto importante a ser tratado é o fato de a corrente de pensamento conhecida por *Naturphilosophie* ter se colocado no caminho de Ohm por intermédio de seus adeptos, por conta de diferentes visões de ciência, atrapalhando-o de certo modo, ao mesmo tempo que apresentam uma semelhança que será tratada mais adiante.

Não há um consenso sobre o que se entende por *Naturphilosophie*.³¹ Embora haja essa falta de definição, a ideia de unidade é algo que se apresentava nessa corrente de pensamento,

²⁷ Vogel, 262.

²⁸ Jungnickel, 7-8.

²⁹ Waisse-Priven, 67.

³⁰ Garber, *The language of physics*, 142.

³¹ Waisse-Priven, 64. A autora faz uma compilação crítica de visões distintas sobre a ciência romântica germânica e a *Naturphilosophie*, além de fornecer outras referências sobre o tema, o que pode ser interessante para o leitor que quiser se aprofundar no assunto.

uma vez que ela representava o projeto de construção de um sistema geral da natureza.³² Ademais, a característica principal da *Naturphilosophie* seria a oposição à tendência dominante da ciência moderna da especialização crescente juntamente com um empirismo. Essa teria sido a pauta programática geral, que incluía uma filosofia especulativa da natureza, liderada por Schelling e Hegel.³³ Essa oposição ao empirismo, feita pelos adeptos desta corrente de pensamento, foi um dos motivos de embates entre eles e outros estudiosos que buscavam, por meio de experiências, entender e explicar determinados fenômenos físicos, dentre os quais Ohm estaria inserido.

No entanto, um ponto importante a se apontar é que, embora a *Naturphilosophie* fosse uma corrente de pensamento alternativa às ideias de Kant, ela teria incorporado a visão de unidade da natureza do filósofo.³⁴ Essa ideia de unidade convergiu com o pensamento de alguns estudiosos, dentre os quais o próprio W. von Humboldt, embora ele não tivesse sido um adepto da *Naturphilosophie*.³⁵ Ainda em relação a esta questão da unidade, é relevante mencionar que Paul Erman (1764-1851), Thomas Johann Seebeck (1770-1831), Christopher Heinrich Pfaff (1773-1852) e Julius Conrad von Yelin (1771-1826) tentaram determinar se galvanismo e eletricidade eram o mesmo. Ademais, Erman trabalhou em questões ligadas à relação entre eletricidade e magnetismo. E Thomas Seebeck, por meio de seus estudos, conectou as áreas de eletricidade e do calor.³⁶ O próprio trabalho de Ohm sobre o galvanismo foi visto como uma pesquisa que conectou áreas diferentes do conhecimento da época. Enfim, embora por motivos aparentemente diferentes, é possível perceber que havia uma propensão de alguns estudiosos da física germânicos da época pela busca de uma unidade dos fenômenos, o que também é corroborado por outros autores que abordaram os trabalhos destes estudiosos no século XIX.³⁷ E, como será visto mais adiante, também pode-se perceber esta ideia em um dos artigos de Ohm no qual investiga questões sonoras. No momento, contudo, retornar-se-á à corrente de pensamento denominada *Naturphilosophie*.

Possivelmente por ter ido contra a tendência dominante, em geral coloca-se a *Naturphilosophie* como uma corrente que tenha atrasado ou atrapalhado o avanço da ciência, visão que parece estar bastante calcada na ideia de ciência como progressiva. De qualquer

³² Ibid., 68.

³³ Ibid.

³⁴ Garber, 142.

³⁵ Jungnickel, 4.

³⁶ Ibid., 43-44.

³⁷ Ibid., 45.

modo, além de tudo o que já foi mencionado, ela participou de fato de um embate de ideias e das formas de se fazer ciência à época.

Os estudiosos experimentais da física, incluindo o antigo editor do importante periódico *Annalen der Physik*, Ludwig Wilhelm Gilbert (1769-1824), lutaram contra esta corrente de pensamento, pois, segundo eles, a *Naturphilosophie* teria prejudicado a física germânica.³⁸ Embora para Gilbert a física não precisasse ser necessariamente matemática, ela era uma ciência empírica.³⁹ Erman, que se incluía entre os estudiosos avessos à *Naturphilosophie*, precisou resistir ao desprezo de Hegel pelas ciências naturais exatas e sua influência sobre o ministro Karl vom Stein zum Altenstein (1770-1840) até o fim da década de 20.⁴⁰

Ohm também teve atrito com um adepto da *Naturphilosophie*, o professor Georg Friedrich Pohl (1788-1849), da Universidade de Berlim. De acordo com Jungnickel, Pohl não era um físico típico nem matemático. Este professor pertencia a um grupo sob a influência de Hegel.⁴¹ No entanto, Pohl teria sido o único estudioso que de imediato leu e comentou o livro de Ohm sobre a corrente galvânica, publicado em 1827, em Berlim.

Jungnickel relembra a afirmação de Pohl de que Ohm não teria prestado atenção à “essência” do circuito e meramente teria expressado algumas propriedades da eletricidade em fórmulas. E que não foi realizada de fato uma contribuição, mas uma mera aplicação dos trabalhos de Fourier e de Poisson em outras partes da física.⁴² Um duro golpe em um estudioso que estava buscando uma posição que lhe fornecesse melhores condições de pesquisa.

Após ter enfrentado a resistência de Pohl, Ohm enviou uma cópia de seu livro sobre a corrente galvânica de 1827 para o rei da Baviera com o objetivo de conseguir um posto de trabalho apropriado para suas pesquisas. O rei encaminhou o trabalho para a Academia Bávara de Ciências, mas seus membros não queriam o estudioso na Universidade de Munique supostamente devido à disputa pela utilização dos aparatos. O presidente da academia, o

³⁸ Ibid., 27.

³⁹ Garber, 145.

⁴⁰ Jungnickel, 27.

⁴¹ Ibid., 56. Tomando como referência a Universidade de Berlim, pode-se dizer que a *Naturphilosophie* era dominante na instituição nas suas duas primeiras décadas de existência. Alguns experimentalistas começaram a ingressar como professores na universidade na década de 1820, mas as maiores mudanças produziram-se a partir da nomeação de Pogendorff, em 1834. Em 1830, no entanto, Pohl ainda seria nomeado, sendo possivelmente o último *Naturphilosopher* a ser contratado pela instituição e marcando um momento importante da corrente de pensamento. Cf. Waisse-Priven, 83-84. Inclusive, em 1829, Pohl havia sido aceito para a Universidade de Berlim e Ohm rejeitado em 1831. Cf. Jungnickel, 18.

⁴² Ibid., 56.

Naturphilosoph Friedrich Wilhelm Joseph von Schelling (1775-1854) também se colocou contra Ohm (ou ao menos não o ajudado), oferecendo-o somente uma posição extraordinária sem salário. Ohm também tentou obter um posto na Universidade de Berlim após o falecimento de um professor da instituição, mas o ministro alegou que a universidade estava bem suprida de professores.⁴³ Essa resistência é significativa, pois, como será tratado mais adiante, apesar das diferenças entre Ohm e os *Naturphilosophen* nas formas de se enxergar e fazer ciência, pode ser observada uma semelhança entre algumas ideias defendidas pelos adeptos da *Naturphilosophie* e a postura de Ohm em relação a seus trabalhos.

Outro ponto bastante importante de ser levantado é a questão da utilização da matemática na física, ou ainda, considerando como área de estudo, a física matemática. O assunto é bastante intrincado, pois a própria relação entre as áreas à época mostrava-se complexa, de tal forma que cada estudioso via a questão de uma maneira, havendo um grande debate sobre o papel que a matemática poderia desempenhar na compreensão dos fenômenos físicos à época. Embora não seja viável uma discussão sobre tal tema nesta pesquisa, o assunto não pode ser de todo ignorado se se pretende compreender o contexto abordado e consequentemente os trabalhos de Ohm sobre o som.⁴⁴

Poucos físicos germânicos pareciam ter conhecimento suficiente sobre o tema para avaliar o trabalho sobre a corrente galvânica de Ohm (1827). Ou então não julgavam necessário, como teria sido o caso de Johann Salomo Christoph Schweigger (1779-1857), o editor do *Journal für Chemie und Physik*, que recebeu uma cópia do livro que apresentava o trabalho. Além disso, o ministro enviou uma cópia para um colega de Schweigger, que também não teria compreendido suficientemente a matemática presente na pesquisa.⁴⁵ Ou seja, claramente para estes estudiosos a matemática não tinha o mesmo papel e importância que para Ohm. Foi nesse contexto que o trabalho chegou a Pohl, que realizou a mencionada revisão desfavorável a Ohm.

À época dos trabalhos de Ohm, a maioria dos experimentalistas germânicos pareciam suspeitar do uso da matemática na física e, para alguns, era impossível acreditar que qualquer conhecimento da natureza poderia ser adquirido através da matemática. Para alguns, ela era unicamente produto da mente humana, que a princípio não estava relacionada ao mundo real.⁴⁶ Porém, essa não era a postura de todos os estudiosos do período. Concomitantemente havia

⁴³ Ibid., 57-58.

⁴⁴ Sobre a visão de diversos estudiosos da época acerca de tal questão, cf. Garber, 145-48.

⁴⁵ Jungnickel, 56.

⁴⁶ Garber, 146.

também os defensores da utilização da matemática na física. Neste time, haveria aqueles que enxergavam as áreas como complementares, enquanto outros enxergavam a impossibilidade de uma teoria física sem a matemática, embora esses últimos formassem uma minoria.⁴⁷

Ainda a respeito das relações entre física e matemática, a visão do estudioso Johann Tobias Mayer (1752-1830) se destaca: para ele, as áreas da física sujeitas ao tratamento matemático eram consideradas parte da matemática. Por exemplo, os trabalhos de Euler e Lagrange sobre o som e o de Fourier sobre o calor, eram considerados por ele como matemáticos, não físicos. Por outro lado, para Ernst Gottfried Fischer (1754-1831), a generalização somente era possível por meio da matemática.⁴⁸

Apesar das divergências de visões dos estudiosos, os trabalhos sobre a história da física em geral parecem apontar para uma certa resistência e em alguns casos até falta de conhecimento matemático suficiente para a utilização em investigações físicas à época de Ohm, conforme mencionado. Ao mesmo tempo, parece ter ocorrido paulatinamente uma transformação na forma de se estudar física ao longo do tempo. Pouco a pouco a matemática iria ganhando cada vez mais espaço nas tentativas de se explicar os fenômenos físicos da natureza, bem como sendo usada de forma mais abstrata. Embora seja difícil precisar onde estaria Ohm no meio desta transformação, é importante saber que ele estava inserido nela e ajudando a realizá-la.

Essa resistência da utilização matemática na área da física parece ser um ponto crucial para compreender os trabalhos acústicos de Ohm, uma vez que a matemática desempenha um papel fundamental em suas pesquisas. De modo algum é possível afirmar que a matemática não era utilizada na física à época das investigações de Ohm, ou seja, que uma física matemática não era praticada por ele.⁴⁹ Mas pode-se inferir que a forma do estudioso conduzir suas pesquisas não era hegemônica, ao menos em terras germânicas.

O artigo de Kenneth Caneva sobre a transformação da física praticada na primeira metade do século XIX no local em questão traz algumas reflexões interessantes e que também podem auxiliar na compreensão deste tema e, por conseguinte, dos trabalhos acústicos de Ohm. Embora o foco do trabalho de Caneva tenha sido as áreas de eletricidade e magnetismo, em

⁴⁷ Ibid., 147.

⁴⁸ Ibid.

⁴⁹ Ver nota 44.

geral suas reflexões dizem respeito à forma de se fazer ciência, o que abarcaria também as áreas dos estudos do som.

Caneva defende, em seu trabalho, que a física germânica sofreu uma mudança na forma de ser realizada, afirmando que ela teria passado de uma forma concreta para uma abstrata, cada qual com diversas características descritas pelo autor ao longo do artigo. O pesquisador coloca Ohm entre essas duas gerações de estudiosos, afirmando que ele apresentava características de ambas, de forma mesclada. Apesar da abordagem demasiadamente compartimentalizada de apresentar os cientistas da época, algumas mudanças apontadas por Caneva parecem de fato ter ocorrido em alguma medida.

Segundo o pesquisador, existem vários pontos que diferenciam os dois grupos. Em particular, aqueles que envolvem a matemática de alguma maneira são interessantes para esta pesquisa. Caneva aponta que a física praticada pela geração mais antiga tinha uma tendência mais qualitativa, ou seja, não buscava expressões matemáticas, ao contrário da praticada pela geração mais recente. A conceitualização, no caso da geração anterior, partia de uma representação mais pictórica do fenômeno. Ver-se-á mais adiante que Ohm não somente buscava, como obteve expressões matemáticas em seus trabalhos, neste caso se aproximando mais de uma forma mais moderna de se fazer física. Para a geração anterior, a matemática tinha uma limitação na descrição dos fenômenos físicos.

Ainda sobre a relação entre a matemática e os fenômenos físicos, Caneva aponta que a geração anterior fazia uma distinção entre conhecimento físico e conhecimento matemático, enquanto para a geração posterior a explicação de um fenômeno físico estava associada inextricavelmente à sua descrição matemática. A postura de Ohm frente à pesquisa parece estar mais associada a esta segunda, como será abordado mais à frente neste trabalho.

E o que teria contribuído para que Ohm tivesse essa abordagem um tanto diferenciada para os padrões do meio que ele estava inserido? Uma resposta para esta pergunta parece estar nos seus estudos iniciais. Embora tenha estudado em um *Gymnasium* e depois numa *Universität*, formação que lhe daria base para suas pesquisas físicas, Ohm também havia estudado com seu pai e posteriormente voltou-se aos trabalhos clássicos franceses da época (Lagrange, Legendre, Laplace, Biot, Poisson, dentre outros). Esta base parece ter influenciado

seus trabalhos de forma importante, principalmente os trabalhos de Fourier, tanto em trabalhos sobre a corrente galvânica quanto em trabalhos sobre o som.⁵⁰

Em relação ao embate Pohl-Ohm acima mencionado, o choque de ideias foi bastante evidente. Ohm não teria prestado atenção à “essência” do circuito, disse Pohl. Mas por outro lado, quando se presta atenção ao que pensava Fourier, infere-se que Ohm estaria mais próximo da postura do estudioso francês do que da postura de Pohl na forma de se fazer ciência. Se de fato Ohm não prestou atenção à essência do circuito (no sentido em que Pohl entendia), possivelmente é porque não era essa sua intenção, ou seja, seu objetivo seria notadamente encontrar leis simples e constantes (assim como Fourier, como será visto mais adiante). Na realidade, para Ohm encontrá-las era justamente investigar a essência do objeto estudado.

Ou seja, a maneira que Ohm utilizou a matemática em suas pesquisas estaria conectada aos objetivos de encontrar essas leis. E tudo isso teria sido influenciado por diversos estudiosos franceses, o que não seria um acontecimento pontual, mas parte de uma interação maior, a qual teria ocorrido aproximadamente a partir da virada do século XVIII para o XIX, no contexto que os experimentalistas franceses inspiraram estudiosos britânicos e germânicos. Nesse processo, acabaram sendo reorientados os problemas de pesquisa e os termos de suas soluções pelos experimentalistas e pelos matemáticos. Além disso, teria havido uma tentativa de emulação da ciência francesa a partir de 1820 pelos britânicos e pelos germânicos. A partir deste intercâmbio, cada vez mais a análise matemática foi ganhando espaço em terras germânicas no que tange os estudos sobre a natureza.⁵¹

Nas primeiras décadas do século XIX, algumas vezes havia oposição entre os métodos experimentais de pesquisa e os matemáticos em meios germânicos. No entanto, de modo geral os trabalhos utilizando os dois métodos eram apreciados, embora a utilização do “poder mágico da análise” para resolver todos os problemas não fosse bem-vista. Havia quem considerasse um exagero a forma de os franceses utilizarem a matemática na física, de modo que tais teorias não explicavam a “natureza e comportamento” dos fenômenos físicos. Além do mais, para os pesquisadores germânicos muita matemática tornaria o trabalho muito abstrato e faltaria

⁵⁰ Caneva, “Georg Simon Ohm”, 192. Von Füchtbauer, 128. O estudo dos trabalhos destes pesquisadores franceses Ohm teria realizado no período em que esteve em Colônia e teria contribuído para que o estudioso se voltasse aos estudos sobre eletricidade.

⁵¹ Garber, 137-38; 148.

Anschaulichkeit (algo como a capacidade de ser ilustrado). Faltariam imagens para serem apreendidas pelos sentidos para uma verificação empírica.⁵²

Pela metade da década de 1820, os “imponderáveis” (movimentos não observáveis dentro dos corpos) foram sujeitos a tratamentos matemáticos pelo trabalho de grandes físicos franceses, sendo introduzidos em terras germânicas por meio de traduções de trabalhos publicadas no periódico *Annalen der Physik* ou incluídas em livros-texto germânicos na área de física.⁵³ Essa interação não pode ser desconsiderada ao se investigar os trabalhos dos estudiosos em física germânicos do século XIX. De modo mais específico, ela teria afetado os trabalhos de Ohm tanto sobre o galvanismo quanto sobre o som, por analogias realizadas ou pela utilização da análise matemática.

Ademais, na década de 1840, a análise matemática já era utilizada extensivamente pelos estudiosos germânicos e os trabalhos dos estudiosos franceses eram frequentemente citados.⁵⁴ E em relação a Ohm, a situação não foi diferente, o que se pode perceber a partir de sua inspiração em Fourier e do material que mantinha em seu poder (trabalhos de Cauchy, Poisson, Fourier, Lacroix e outros estudiosos). Para o estudioso, a física e a matemática caminhavam juntos, e sua atuação como professor em ambas as áreas mostra sua proficiência nelas e ajuda a ilustrar sua visão de ciência. E essa junção aparece também em seus estudos sobre os tons da sirene.⁵⁵

Embora Pohl não seja um representante típico de estudioso da física do período, o choque de ideias com Ohm, aliado ao desinteresse e possivelmente ao desconhecimento de outros estudiosos em relação à matemática utilizada, corroborariam a ideia de que Ohm estava praticando uma física diferenciada, ao menos em relação ao que se realizava em terras germânicas. E essa diferenciação parece estar inserida no contexto de mudanças na forma de se estudar a física, inclusive em relação ao papel conferido à matemática nestas investigações, tendo esta um caráter mais abstrato. Seus estudos sobre o som caminharam nesse sentido, como será tratado mais adiante.

⁵² Jungnickel, 44.

⁵³ Ibid., 31-32.

⁵⁴ Ibid., 128. A autora afirma que por volta da década de 1840, a análise matemática era extensamente utilizada pelos físicos germânicos, por conta do contato com pesquisas de estudiosos franceses.

⁵⁵ Ibid., 53. O material que Ohm possuía, juntamente com sua listagem, encontra-se disponível no Deutsches Museum.

Um ponto interessante a se observar é que, a partir desta utilização matemática mais abstrata, Ohm consegue utilizar métodos de resolução ou ferramentas em diferentes áreas da física. Assim teria sido tanto nos estudos da corrente galvânica quanto nos estudos sobre o som. Esta forma de se trabalhar possivelmente propiciou a aproximação de áreas, o que curiosamente remete à ideia da construção de um sistema geral da natureza da *Naturphilosophie*.

1.2 A trajetória de Ohm antes dos estudos sobre acústica

Ohm foi um estudioso da física nascido em Erlangen, na Baviera, filho de um casal protestante. Embora serralheiro de profissão, o pai do estudioso era autodidata em matemática, física, química e filosofia e forneceu uma sólida formação aos seus dois filhos homens nessas áreas. Depois de ter recebido esta formação inicial e de passar pelo *Gymnasium* de Erlangen (1800-1805), Ohm ingressou na Universidade de Erlangen, na qual estudou por pouco tempo (de maio de 1805 a setembro de 1806).⁵⁶ Em seguida, o estudioso ficou por cerca de três anos e meio em Gottstadt, no cantão de Berna, lecionando matemática no *Pfarrer Zehender's Erziehungsinstitut* (Instituto Educacional do Padre Zehender) e depois mais cerca de dois anos na cidade prussiana de Neuenburg (atual Neuchâtel) como tutor particular. Antes de ir para Neuenburg, desejava ir para Heidelberg com o matemático Karl Christian von Langsdorf (1757-1834), que o teria convencido do contrário e o aconselhado a estudar por conta própria os trabalhos de Euler, Laplace e Lacroix. Além de objetivar o trabalho como tutor particular de forma independente de qualquer instituição, Ohm foi a Neuenburg para cultivar a conversação na língua francesa.⁵⁷ Embora normalmente os trabalhos de cunho histórico sobre Ohm e suas pesquisas não evidenciem muito este fato, essa formação do estudioso, principalmente o estudo dos clássicos franceses, será marcante em suas futuras investigações físicas, fato que será retomado num ponto oportuno do presente trabalho.

⁵⁶ Caneva, “Georg Simon Ohm”, 186. De acordo com Caneva, Ohm teria abusado em relação à dança, ao bilhar e à patinação no gelo, o que desagradou ao pai, e por isso a interrupção nos estudos.

⁵⁷ Sobre o desejo de ir para Heidelberg cf. Caneva, “Georg Simon Ohm”, 186 e von Füchtbauer, 92; sobre o aconselhamento de Langsdorf, cf. Caneva, “Georg Simon Ohm”, 186; e sobre o desejo de independência e do cultivo da língua francesa, cf. von Bauernfeind, “Georg Ohm”, 188. Carl M. von Bauernfeind foi aluno da Escola Politécnica de Nuremberg e posteriormente diretor da Escola Politécnica de Munique.



Figura 1: Retrato de Georg Simon Ohm.⁵⁸

Em 1811, Ohm retornou à Baviera para a sua cidade natal, Erlangen, para completar sua formação interrompida. Após receber seu grau de Doutor em Filosofia⁵⁹ pela Universidade de Erlangen, lecionou matemática por três semestres como *Privatdozent*⁶⁰, seu único vínculo como professor universitário anterior a 1852, quando é apontado para a Universidade de Munique, apenas dois anos antes de seu falecimento. No ano de 1812, o estudioso mudou-se para a cidade de Bamberg, também na Baviera, atuando como professor em uma *Realschule*⁶¹, período em que formulou seu livro sobre geometria voltado ao ensino (mais precisamente em 1814), o qual viria a ser impresso em 1817. Depois da dissolução da escola (1815/16), que não estava atraindo muitos alunos, Ohm lecionou ainda numa lotada *Oberprimärschule*⁶², na mesma cidade que a anterior.⁶³

⁵⁸ “Georg Ohm: German physicist”, Encyclopedia Britannica, acessado em 10 de novembro de 2021, <https://www.britannica.com/biography/Georg-Ohm>.

⁵⁹ O trabalho escrito referente à obtenção de seu título não está disponível, segundo seu sobrinho-neto von Füchtbauer. Possivelmente, segundo o parente, um trabalho “sobre luz e cores” foi entregue ao professor Dr. Ludwig Sachs para esta finalidade.

⁶⁰ Para obter a posição de *Privatdozent* nas universidades germânicas do século XIX, era necessário ter um título dado pela universidade e dava o direito de ministrar aulas em uma determinada instituição, porém sem receber um salário. Os estudantes que assistiam a estas aulas pagavam taxas ao professor. Cf. Rogerson, *Old Testament Criticism*, xiii.

⁶¹ Ver nota 16.

⁶² A *Oberprimärschule* era uma escola preparatória anexada a um *Gymnasium*. Cf. Deuerlein, “Georg Simon Ohm”, 10.

⁶³ Deuerlein, “Georg Simon Ohm”, 9-10.

De acordo com dados biográficos, Ohm teria atacado o obsoleto modo de ensinar e o que ele chama de “despotismo mental” no prefácio do livro que Ohm escreveu sobre Geometria. Por esse motivo, Ohm foi considerado um revolucionário e recebeu um relatório em 1819 ridicularizando-o.⁶⁴ Esse teria sido um possível motivo pelo qual o estudioso não conseguiu utilizar seu livro a fim de conseguir um emprego melhor na Baviera, embora outros sejam levantados mais adiante nesta pesquisa.⁶⁵

Em novembro de 1817, Ohm decide sair de sua pátria para tentar melhor sorte na Prússia, mais especificamente na cidade de Colônia. Aparentemente foi em um *Gymnasium*⁶⁶ jesuíta nesta cidade, que o estudioso encontrou melhores condições para suas pesquisas em física, podendo se utilizar de um laboratório bem equipado na posição de *Oberlehrer*⁶⁷ de matemática e física.⁶⁸

Essa foi uma questão importante na trajetória de Ohm, uma vez que ele não possuía recursos para obtê-los por conta própria. Nesse aspecto, parece ter pesado o fato de ter nascido em uma família que não lhe poderia oferecer auxílio. Desta maneira, sendo Ohm um estudioso da física que buscava construir seu conhecimento a partir de experimentos e não tendo condições próprias de adquirir os instrumentos que julgava necessário para realizá-los, a única alternativa restante seria obter acesso a eles nas instituições.⁶⁹

Teria sido a partir da sua posição em Colônia que Ohm teria se transformado de matemático em físico.⁷⁰ De fato, após suas atuações como professor de matemática, bem como da publicação de seu livro voltado ao ensino de geometria, e agora equipado com um laboratório razoável, Ohm publicou uma série de trabalhos relacionados à corrente galvânica entre os anos de 1825 a 1833, inclusive seu famoso livro *Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet* (A corrente galvânica trabalhada matematicamente). No entanto, parece que as condições ainda não eram tão boas, uma vez que a partir do ano de 1826 ele já não estava mais em Colônia, mas

⁶⁴ Ibid., 10.

⁶⁵ À época, a produção bibliográfica era levada em consideração para os candidatos a professores nas instituições conquistarem uma vaga, ou ainda para promoções. Cf. Jungnickel, 23.

⁶⁶ Ver nota 16.

⁶⁷ O *Oberlehrer* era o professor das escolas secundárias germânicas mais prestigiosas da época. Cf. Caruso, “Liberal governance”, 224; Paulsen, xii-xiii e 197- 235.

⁶⁸ Caneva, “Georg Simon Ohm”, 186.

⁶⁹ Embora nem assim isso seria tarefa fácil, uma vez que nem todo professor de física de uma universidade recebia algum dinheiro ou dinheiro suficiente para manter os instrumentos. Felizmente algumas escolas também tinham equipamentos, o que faziam com que alguns professores de universidade buscassem trabalhar nelas, a fim de terem acesso a eles. Inclusive era usual em terras germânicas que os pesquisadores em física fossem professores em escolas. Cf. Jungnickel, 8, 13.

⁷⁰ Deuerlein, *Georg Simon Ohm*, 11.

em Berlim, local em que foi impresso o mencionado livro (1827). Um ano após a sua chegada em Colônia, Ohm fez uma nova tentativa de conseguir um posto em uma universidade prussiana, estimulado pela liberdade do trabalho científico que estava tendo em seu novo local de trabalho⁷¹, mas por um motivo desconhecido novamente não obteve sucesso.

No ano de 1826, Ohm fez um pedido para se afastar de suas atividades e ir para Berlim, por estímulo de seu irmão Martin, que tinha conseguido um emprego como professor universitário e tinha arrumado moradia na cidade. No mesmo ano, seu pedido foi aceito e Ohm se mudou para a cidade, o que lhe deu acesso a livros em bibliotecas e tempo disponível para suas pesquisas, o que rendeu o famoso livro *Die galvanische Kette*, dentre outros trabalhos.⁷² No entanto, à época Ohm ainda não havia conseguido sua tão almejada posição universitária.

O livro de 1827 não teria tido tanto sucesso devido a um erro presente em um artigo anterior, publicado no *Schweiggers Journal* em 1825 quando ainda estava em Colônia.⁷³ Isso pode ter influenciado na questão de Ohm não ter conseguido um posto universitário em terras prussianas. Além disso, Ohm teria sofrido uma resistência ideológica de um conselho secreto no ministério, representante de uma filosofia especulativa hegeliana, pelo fato de ele ser um físico que fazia medições e observações. O estudioso foi descrito por Ludwig Hartmann como "vítima desta intolerante e infalível *Naturphilosophie* hegeliana", que "de fato impediu o progresso da investigação física durante uma década".⁷⁴ Estas questões necessitariam melhor investigação, mas não nos parece plausível que um erro em um trabalho teria impedido Ohm de conseguir um emprego que lhe possibilitasse melhores condições de pesquisa, se o valor geral de seu trabalho tivesse sido reconhecido. A segunda questão parece fazer mais sentido, uma vez que, por mais interessantes que tivessem sido as contribuições de Ohm, se elas fossem incompatíveis com o que pensavam os que detinham o poder, estes não teriam como ver os trabalhos (e seu autor) com grande estima, o que seria conseqüentemente um motivo para não o aceitar em sua equipe de professores/pesquisadores.

Outras tentativas de encontrar um emprego foram realizadas pelo estudioso, mas sem sucesso, uma vez que ele precisava de condições materiais mínimas para realização de suas pesquisas. A difícil situação financeira e os insucessos fazem Ohm querer sair de Berlim. A

⁷¹ Ibid., 11.

⁷² Ibid.

⁷³ Ohm, "Vorläufige Anzeige des Gesetzes".

⁷⁴ Hartmann, *Georg Simon Ohm*, 83. Tradução do original. Todas as traduções presentes neste trabalho são próprias, a menos que seja mencionado o contrário. Deuerlein, *Georg Simon Ohm*, 14.

esse respeito, o estudioso escreve: “Troco Berlim pelo inferno se for preciso, preferivelmente pelo céu, mas apenas com uma condição: o local onde me vou instalar deve permitir-me continuar o meu trabalho puramente científico.” Em 1829, ele tentou outras vezes algum posto de professor, sem sucesso.⁷⁵ Apesar de ter realizado em 1827 o trabalho que posteriormente foi reconhecido como uma de suas maiores contribuições (senão a maior), é bastante claro, a partir da fala de Ohm e de suas tentativas de obter melhores condições de trabalho, que ele não estava nada satisfeito. Em cada momento, porém, um infortúnio atrapalhava seus propósitos.

Em 1831, Ohm havia tentado ingressar como professor na Universidade de Berlim, mas não obteve sucesso. Dois opositores seus, no entanto, conseguiram uma posição na instituição. Pohl havia ingressado em 1829 como professor extraordinário de física, e Seebeck, como *Privatdocent*, em 1831.⁷⁶ Não desejando voltar para Colônia e ainda almejando melhores condições para prosseguir suas pesquisas, Ohm retornou à sua cidade natal, Erlangen. Após cinco requerimentos de emprego direcionados ao rei Luís I, da Baviera, conseguiu uma vaga como professor de física na Escola Politécnica de Nuremberg, o que ocorreu em 1833.⁷⁷ Não era exatamente o que Ohm queria, já que preferia ter sido nomeado para a Escola Politécnica de Munique⁷⁸, possivelmente por conta de melhores condições de pesquisa. Apesar de todos os pareceres de Munique indicarem que Ohm era “um homem calmo, inofensivo e trabalhador”, não havia lugar para ele na cidade.⁷⁹

De qualquer forma, Ohm estava agora em uma instituição de ensino e, portanto, em condições (ainda que não ideais) de retomar seus trabalhos de pesquisa. No entanto, por conta de suas variadas ocupações, iria demorar alguns anos para fazê-lo, voltando-se aos estudos do som.

A Escola Politécnica de Nuremberg foi fundada em 1823, com o intuito de formar cidadãos nas áreas comerciais e industriais, tendo como objetivo obter uma melhora econômica da cidade após as guerras napoleônicas e foi inspirada na *École Polytechnique de Paris*. Inicialmente, a instituição possuía oficinas de tornearia, serralheria, carpintaria, trabalho com

⁷⁵ Hartmann, 146-48; Deuerlein, *Georg Simon Ohm*, 15. A citação é retirada de uma carta escrita por Ohm ao seu ex-aluno Joh. J. Kribben, que por agradecimento às suas proveitosas aulas estava oferecendo um cargo de diretor em uma escola, o qual Ohm recusou.

⁷⁶ Jungnickel, 18. Jungnickel afirma que esses e outros ingressos faziam parte de uma maior abertura para estudiosos da área da física por parte das universidades.

⁷⁷ Deuerlein, *Georg Simon Ohm*, 15.

⁷⁸ Hartmann, 161.

⁷⁹ Deuerlein, *Georg Simon Ohm*, 15.

metais e um pequeno laboratório de química. Ao longo dos anos, a escola foi ganhando novos cursos e novas instalações até o ano de 1828, no qual ganhou um novo prédio, adquirido pelo município de Nuremberg.⁸⁰

Após algumas ampliações e contratações, no ano de 1832 é publicado um decreto para que a escola fosse nacionalizada, ou seja, deixasse de ser administrada pelo município de Nuremberg e passasse a ser administrada pelo Reino da Baviera, embora o processo fosse concluído apenas em 1836. Ohm é contratado como professor em 1833, em meio a estas mudanças administrativas (já pelo ministério).⁸¹ Um momento no mínimo agitado, que talvez não fosse o ideal para o desenvolvimento de trabalhos de pesquisa, o que também ajuda a explicar o período sem publicações do estudioso.

Em junho de 1834, Scharrer solicitou sua exoneração do cargo de reitor. Sua justificativa foi que a escola técnica estava sofrendo transformações no sentido de dar mais ênfase à educação científica, em detrimento da formação profissional, a qual era bastante prezada por ele. Deste modo, ele acreditava que um homem de ciência deveria assumir a condução da instituição e por esse motivo indicou Ohm para a posição. Porém, neste primeiro momento a solicitação foi negada e Scharrer permaneceu no cargo. De qualquer forma, em 1835, Ohm recebeu a incumbência de fazer a inspeção científica da escola.⁸²

Também no ano de 1835, faleceu um antigo amigo e apoiador dos irmãos Ohm, o matemático Johann Wilhelm Andreas Pfaff (1774-1835), da Universidade de Erlangen. Ohm e seu irmão Martin se interessaram pelo cargo, porém o matemático Karl Georg Christian von Staudt (1798-1867), colega de Ohm na Politécnica, foi contratado. Com a saída de von Staudt da politécnica de Nuremberg, Ohm assumiu também as aulas de matemática da instituição, além das de física de que já era responsável.⁸³ A partir destas informações é possível imaginar um Ohm atarefado, lutando, sem grande sucesso, por melhores condições para continuar a desenvolver suas pesquisas. De fato, entre os anos de 1834 e 1838, Ohm não publicou nenhum novo trabalho, o que não é de se espantar no contexto que acaba de ser exposto.

⁸⁰ Deuerlein, *Höhere technische*, 10-12.

⁸¹ *Ibid.*, 14, 18.

⁸² Von Füchtbauer, 209. É incongruente que Scharrer tenha indicado uma pessoa que tinha um perfil oposto ao que achava o ideal para a escola, indicando que pode haver algum acontecimento adicional não relatado por von Füchtbauer.

⁸³ Deuerlein, *Georg Simon Ohm*, 16.

Em 1838, ocorreu a construção da primeira ferrovia germânica. Por conta dos serviços prestados por Scharrer nesta obra, ele acabou tendo sua saúde prejudicada, bem como uma diminuição de tempo para a administração da escola, além de ter utilizado dinheiro próprio neste empreendimento. Por estes motivos, em 1839 o rei acabou por aceitar sua demissão e nomeou Ohm para o cargo de direção da Escola Politécnica de Nuremberg, mais uma vez por indicação do próprio Scharrer.⁸⁴

Nessa mesma época, após cerca de seis anos sem trabalhos publicados, Ohm voltou-se ao estudo do som. O sobrinho-neto de Ohm afirma que é curioso que o estudioso tenha escolhido esta área, pois ele era completamente não musical.⁸⁵ Essa afirmação tanto pode querer dizer que Ohm não recebeu formação musical alguma quanto que não tinha aptidão para a música ou, ainda, ambos. O que então teria levado Ohm a se aventurar por esta área? Segundo a biografia, Ohm tinha como fundamento que as leis da natureza eram de grande simplicidade e escopo, ainda que os fenômenos pudessem ser complexos, porém ele estava vendo as interpretações nesta área caminharem em um sentido oposto. Por este motivo, viu um certo “perigo” ameaçando os trabalhos científicos em acústica e por isso resolveu entrar para a área, publicando, em 1839, seu primeiro trabalho sobre o assunto, intitulado “Bemerkungen über Combinationstöne und Stösse” (Observações sobre tons de combinação e batimentos)⁸⁶. Essa forma de se enxergar a natureza tentar encontrar leis simples e gerais vai de encontro ao que pensavam Fourier e outros estudiosos franceses, citados por Ohm em seus trabalhos, como será discutido mais adiante.

Antes de analisar propriamente o primeiro trabalho de Ohm em acústica, é conveniente introduzir neste ponto uma contextualização sobre o que são os tons de combinação e os batimentos, quais os motivos de terem sido estudados na época, quem e como estudaram estes fenômenos. Desta maneira, ficarão mais claros os objetivos de Ohm em sua pesquisa sobre acústica.

⁸⁴ Deuerlein, *Höhere technische*, 21; von Füchtbauer, 210.

⁸⁵ *Ibid.*, 226.

⁸⁶ *Ibid.*; Ohm, “Bemerkungen”.

1.3 Os fenômenos dos tons de combinação e dos batimentos

No século XIX, havia poucos trabalhos em acústica publicados em terras germânicas. Segundo Vogel, ao ser contabilizado o número de trabalhos nesta área, resulta em apenas 2% do total de trabalhos publicados no *Annalen der Physik und Chemie*. Além disso, os estudiosos que publicavam trabalhos na área ou não eram pesquisadores de profissão ou tinham outras áreas como sua principal⁸⁷, como por exemplo o musicólogo prussiano Johann Heinrich Scheibler (1777-1837), que era fabricante de seda e publicou estudos sobre o som.

Não só a acústica apresentava poucos trabalhos à época, como a própria área da física ainda estava institucionalmente em processo de consolidação. Muitos dos pesquisadores que publicavam em renomados periódicos da área não tinham posição em universidade alguma. Ohm e Seebeck, por exemplo, eram professores de escolas, o que era bastante comum naquele contexto. Também podem ser apontados “Friedrich Strehlke, que trabalhou com pratos vibrantes e Roeber, que revisou publicações em acústica para o *Fortschritte der Physik*”⁸⁸ como outros exemplos de estudiosos na mesma situação institucional.

Em 1837, é editado o primeiro volume da coletânea intitulada *Repertorium der Physik* (Repertório da Física), no qual era reunido o que se considerava ser “uma completa composição dos novos avanços desta ciência”⁸⁹. Este trabalho, elaborado pelas mãos de diversos estudiosos, é uma compilação com alguns volumes reunindo diversas áreas da física. No prefácio, fica clara a intenção dos editores, que era de dar continuidade ao trabalho de Gustav Theodor Fechner (1801-1887), editor anterior da coletânea, que tinha como título *Repertorium der Experimentalphysik* (Repertório da Física Experimental). No terceiro volume, encontram-se os temas de acústica, ótica teórica e meteorologia. A parte de acústica, a qual interessa a este trabalho, ficou sob responsabilidade dos já mencionados Roeber e Strehlke.

Dentro desta parte, Roeber publicou uma seção chamada *Combinationstöne und Stösse* (Tons de combinação e batimentos)⁹⁰, além de outras seções relacionadas a instrumentos de sopro. *Repertorium der Physik* é um livro interessante, uma vez que mostra um pouco do que

⁸⁷ Vogel, 261. Segundo o autor, a maioria destes trabalhos tratava da propagação do som.

⁸⁸ Ibid., 262.

⁸⁹ Dove, *Repertorium der Physik I*. A frase entre aspas é o subtítulo da coletânea, de responsabilidade dos físicos Heinrich Wilhelm Dove (1803-1879) e Ludwig Moser (1805-1880).

⁹⁰ Roeber, “Combinationstöne und Stösse”.

era estudado em acústica na época e ajuda a contextualizar o primeiro trabalho de Ohm na área. Em *Combinationstöne und Stösse*, Roeber apresentou contribuições de Scheibler e do físico finlandês Gustaf Gabriel Hällström (1775-1844) relacionados aos fenômenos dos tons de combinação e dos batimentos. Estes fenômenos, como o próprio Roeber mencionou em seu trabalho, eram estudados já há algum tempo, o que ele ilustra a partir de uma revisão de trabalhos anteriores, citando o teórico musical francês Joseph Sauveur (1653-1716) e o italiano Giuseppe Sarti (1719-1802), maestro e mestre de capela em São Petersburgo, com relação aos batimentos, e o músico e teórico musical germânico Georg Andreas Sorge (1703-1778), o físico francês Jean-Baptiste Romieu (1723-1766) e o violinista Giuseppe Tartini (1692-1770), com relação aos tons de combinação, dentre outros.⁹¹

Tom de combinação foi o nome que se deu ao tom que resultava a partir da emissão simultânea de outros dois. Foi também chamada por Tartini, que o estudou com dedicação, de *terzo suono* (terceiro som) e, como exemplificado pelas citações de Roeber, foi objeto de estudo de outras diversas cabeças pensantes ao longo da história da acústica. Apresentar-se-á, a seguir, alguns dos resultados obtidos por Hällström e apresentados por Roeber.⁹²

Para Hällström, o número de oscilações de um tom de combinação era igual à diferença entre os números de oscilação dos tons geradores e não ao máximo divisor comum, como afirmava uma teoria bastante aceita à época. De acordo com Roeber, Hällström teria sido o primeiro a pronunciar a verdadeira lei dos tons de combinação e prová-la com a experiência.⁹³

O terceiro som foi chamado por Hällström de tom de combinação de primeira ordem. Conforme um tom de primeira ordem fosse combinado com um dos tons originais, poderia ser formado um tom de combinação de segunda ordem. De modo semelhante, se um tom de segunda ordem fosse combinado com um outro de primeira ou de segunda ordem, poderia ser formado um tom de combinação de terceira ordem e assim por diante. Porém, para Hällström, estas situações ocorreriam caso as oscilações fossem suficientemente rápidas para a produção dos tons. Caso contrário, produziriam a sensação de batimentos.⁹⁴

Os batimentos, por sua vez, eram sensações conhecidas há tempos pelos músicos. Ao contrário dos tons, os batimentos eram oscilações sonoras não muito agradáveis ao ouvido, de

⁹¹ Ibid., 1-3.

⁹² Aqui a referência é Roeber e o trabalho original é Hällström, *De tonis combinationis*.

⁹³ Roeber, 6.

⁹⁴ Ibid., 8.

um modo geral. Estas apareciam quando dois instrumentos desafinados entre si tocavam simultaneamente⁹⁵. Quanto mais próximas os tons estavam, menos batimentos haveria, até um momento em que os dois tons entrariam em um perfeito uníssono, ou seja, ficariam com os sons exatamente iguais em altura.

Qual o interesse em se estudar o fenômeno dos batimentos? Da mesma maneira que dois tons de alturas muito próximas produziram os batimentos, reciprocamente a presença destes indicaria a proximidade das alturas. Deste modo, era de grande valia compreender mais a fundo este fenômeno, com o objetivo de obter métodos para afinação de instrumentos. É importante lembrar que os meios eletrônicos atuais de afinação não existiam à época, muito menos em tempos anteriores. Scheibler utilizou os batimentos para a afinação de uma corda de um monocórdio. Roeber relata que uma de suas estratégias foi encontrar dois locais (*Nebenstelle*) na corda cujos sons produzidos simultaneamente com a nota lá de um diapasão gerava o exato número de 4 batimentos por segundo. Scheibler teve problemas em relação à precisão do procedimento e por isso precisou desenvolver novas técnicas para remediar o problema.⁹⁶ Outra aplicação dos batimentos feita pelo estudioso foi a determinação do número de oscilações por segundo da nota lá. Utilizando uma corda dividida em 2000 partes e o fato de que o número de batimentos era dado pela diferença entre os números de oscilação de dois sons, Scheibler conseguiu estabelecer uma proporção e encontrou o valor de 443,56 oscilações por segundo.⁹⁷

Para Hällström, os fenômenos dos tons de combinação e dos batimentos eram um a extensão do outro. Ambos surgiam através da combinação de dois tons, porém os batimentos possuíam velocidade de oscilação bastante inferior ao do tom de combinação e por este motivo poderiam ser contados, ao contrário do outro caso, em que as oscilações seriam rápidas demais para tal. Além disso, o estudioso observou que o aparecimento dos batimentos ocorria quando as velocidades de oscilação dos sons geradores eram muito próximas entre si.⁹⁸ De acordo com a teoria de Hällström, a relação entre os fenômenos é praticamente contínua: para pequenas diferenças de oscilações entre os sons originários, formavam-se os batimentos e à medida em que esta diferença fosse aumentando, estes passariam a ser percebidos como um tom de fato, tornando-se o tom de combinação.

⁹⁵ Ou seja, quando suas quantidades de oscilação por período diferiam por pouco.

⁹⁶ Roeber, 19-20.

⁹⁷ Ibid., 23.

⁹⁸ Ibid., 7-8.

É nesse contexto que Ohm publicou, em 1839, seu artigo sobre tons de combinação e batimentos, no periódico *Annalen der Physik und Chemie*⁹⁹. Retomando sua atividade de pesquisa, o estudioso publicou seu primeiro trabalho sobre o som, tendo somente quatro páginas, por meio do qual expôs alguns resultados sem explicitar todos os caminhos e cálculos necessários para chegar a eles¹⁰⁰. Maley Jr. afirma que o pequeno artigo de Ohm é permeado por um ar de dogmatismo, uma vez que logo de início ele assumiu a existência de um tom de combinação cuja frequência é igual ao mínimo divisor comum das frequências dos tons geradores. De fato, Ohm deixou muitos pontos sem explicação, inclusive omitindo cálculos. No entanto, essa questão do tom de combinação mencionado estava provavelmente refletindo uma postura de manutenção de uma tradição, aceita por estudiosos anteriores, a mesma postura que Ohm manterá em um trabalho posterior.¹⁰¹

No trabalho, Ohm fez referência à teoria dos tons de combinação de Hällström. Apesar de expor um resultado que demonstra concordância com parte da teoria, Ohm colocou a seguinte objeção:

Como a forma de oscilação do primeiro tom de combinação hällströmiano e a forma de oscilação de seus tons geradores devem necessariamente sempre ser muito dessemelhantes, então este primeiro tom de combinação não pode fornecer um tom de combinação adicional com nenhum dos dois tons originários, como Hällström viu-se motivado a admitir para a obtenção de seus tons de combinação extras.¹⁰²

Ohm, portanto, rejeitava a ideia de Hällström de como eram produzidos os tons de combinação. Sua explicação para a aparição dos tons de ordem mais alta era dada a partir dos tons harmônicos dos tons originais. Ele não explicitou como isto ocorreria, porém é de se supor que deveria ser algo semelhante à teoria de Hällström substituindo-se os tons de combinação

⁹⁹ Nos anos 1790-1819, o periódico chamava-se *Annalen der Physik* e nos anos 1819-1824, *Annalen der Physik und der physikalischen Chemie*. A partir de 1824, o eminente físico germânico Johann Christian Poggendorff (1796-1877) passou a editar o periódico sob o título de *Annalen der Physik und Chemie* sendo também conhecido por *Poggendorfs Annalen*. A mudança nos nomes do periódico reflete a dificuldade em manter as áreas de estudo separadas. Cf. Fuchs, “Annalen der Physik”, A7-A8.

¹⁰⁰ Ohm, “Bermerkungen”.

¹⁰¹ Maley Jr. *The theory of beats*, 108-109. Vogel também enxerga uma falta de explicações sobre como Ohm chegou aos resultados. Cf. Vogel, 266.

¹⁰² Ohm, “Bemerkungen”, 464.

pelos harmônicos, os quais Ohm implicitamente afirmou que são semelhantes aos tons originários e entre si.¹⁰³

Um outro ponto interessante do trabalho é quando Ohm fala sobre suas dificuldades ao pesquisar os batimentos. Como justificativa para não expor os cálculos que levaram ao resultado obtido, o físico disse que “seu trabalho talvez não tenha sido fundamentado na natureza do objeto”¹⁰⁴. Pela sua afirmação, Ohm parecia não ter aprofundado suas pesquisas o quanto gostaria até o momento do trabalho, demonstrando insegurança e que tinha dúvidas, devido às condições adversas que vivenciava. Corroborar a afirmação o fato de que, em 1842, o estudioso solicitou ao rei Luís I da Baviera o afastamento de suas aulas de matemática recebidas em 1835 para poder se dedicar melhor às suas pesquisas. Sendo assim, neste primeiro trabalho em acústica, Ohm parece ter preferido não se comprometer em expor algo que precisaria ser mais bem pensado, ao mesmo tempo em que não deixou de compartilhar os resultados obtidos, uma forma de não permitir que sua atividade científica esmorecesse.¹⁰⁵

O trabalho parece apresentar um caráter inacabado, dando a entender que deveria ser continuado em algum momento, seja pelo próprio Ohm ou por outro estudioso. Ver-se-á mais adiante que a elaboração deste pequeno trabalho sobre acústica estimulou Ohm a fazer algumas reflexões sobre a natureza de um tom, a qual, segundo a visão do cientista, precisaria ser analisada utilizando-se ideias matemáticas. Estas reflexões vieram à tona em seus trabalhos seguintes sobre o tema, um dos quais será abordado no Capítulo 3, o seu primeiro trabalho sobre o que ele chama de definição de tom.¹⁰⁶ A questão não era uma inquietude exclusiva de Ohm, mas também de Roeber, um estudioso que tinha como missão sintetizar o que consideravam de mais destacado nas pesquisas acústicas da época, o que parece refletir a preocupação de outros pesquisadores.

No período 1840-41, já como reitor da escola politécnica, Ohm publicou duas outras pesquisas, a última tendo sido, segundo seu sobrinho-neto Füchtbauer, importante para consolidar seu trabalho na área de eletricidade¹⁰⁷. Teria sido nesta época que seus trabalhos

¹⁰³ Essa interpretação vai de encontro com a de Maley Jr. Cf. Maley Jr., 105.

¹⁰⁴ Ohm, “Bemerkungen”, 465.

¹⁰⁵ Kromhout aborda em seu trabalho um manuscrito que Ohm teria escrito entre 1839 e 1843, que indica que o estudioso continuou a trabalhar no tema dos tons de combinação e batimentos, embora esse manuscrito também contivesse um conteúdo sobre definição de tom. Cf. Kromhout, 479-480.

¹⁰⁶ Maley Jr. também percebe a conexão entre os temas dos tons de combinação e dos batimentos com a questão da definição de um tom, observando que Roeber também tinha apontado essa relação em duas situações distintas. Cf. Maley Jr., 112.

¹⁰⁷ Von Füchtbauer, 220.

anteriores sobre o tema foram reconhecidos por cientistas eminentes de diversas nacionalidades, os quais utilizaram resultados de Ohm como base para alguns de seus próprios trabalhos¹⁰⁸. Esse reconhecimento também veio da Academia Real Prussiana de Ciências de Berlim, que em 1839 admitiu-o como seu membro¹⁰⁹. Ohm também teve seus trabalhos reconhecidos pela *Royal Society* (Sociedade Real de Londres), a qual, através de seu vice-presidente Sir John William Lubbock, em 13 de novembro de 1841, enviou uma carta a Ohm informando-o que ele estava sendo agraciado pela instituição com a Medalha Copley, um dos maiores prêmios concedidos pela instituição por contribuições em ciência, apesar de seu pouco valor monetário¹¹⁰. A medalha, no entanto, foi enviada somente na primavera de 1843 através da casa de comércio Bethmann em Frankfurt e do coronel prussiano Sr. From, membro da comissão militar em Nuremberg. Praticamente um mês depois da carta que anunciava a Medalha Copley, a Academia Real de Turim comunicou a Ohm que ele havia sido nomeado como seu membro correspondente por meio de uma carta datada de 18 de dezembro de 1841. No ano seguinte, a *Royal Society* fez o mesmo, reconhecendo suas pesquisas matemáticas e físicas, o que ocorreu em 5 de maio de 1842.¹¹¹

No ano de 1841, Seebeck publicou um trabalho no mesmo periódico que Ohm havia publicado seu artigo de 1839, o *Poggendorfs Annalen*, expondo resultados experimentais obtidos através de um instrumento de produção de som não tão comum para a época, a chamada sirene (este e um outro instrumento serão tratados no capítulo seguinte). Após essa publicação e todo o reconhecimento que Ohm havia recebido dos colegas pesquisadores e das instituições, o estudioso resolveu dar continuidade a seus trabalhos em acústica publicando um outro trabalho no mesmo periódico que Seebeck, com o objetivo de explicar os resultados apresentados expostos por este pesquisador. Porém, antes de se entrar propriamente no artigo que Ohm publica em 1843, abordar-se-á suas fontes, a fim de melhor situar e compreender suas ideias.

¹⁰⁸ Von Bauernfeind, 193.

¹⁰⁹ Deuerlein, “Georg Simon Ohm”, 17.

¹¹⁰ Palavras do próprio Lubbock, segundo von Füchtbauer. Cf. von Füchtbauer, 222.

¹¹¹ Ibid., 224.

Capítulo 2. As fontes

Neste capítulo, tratar-se-á dos aparatos que contribuíram para que Ohm se pusesse a refletir sobre a essência de um tom qualquer. Em seguida, abordar-se-á trechos de trabalhos de Fourier relacionados a ideia da superposição dos modos simples de vibração de uma corda, e de seu teorema apresentado em 1822¹¹². E por fim, analisar-se-á o artigo de Seebeck sobre os resultados obtidos por meio da sirene; resultados que Ohm busca explicar utilizando o teorema de Fourier. Deste modo, acredita-se ser possível compreender melhor como Ohm teria chegado a sua forma de lidar com a questão da essência de um tom qualquer e quais as suas bases para tal, ou seja, o que teria levado a que ele realizasse suas pesquisas da forma que o fez.

2.1 Os “novos” instrumentos de produção de tons

No que se refere à documentação em História da Ciência, é sempre importante lembrar que “alguns materiais ‘ganham vida’ e se transformam até adquirirem sentido num determinado contexto, ao mesmo tempo em que possibilitam a compreensão mais aprofundada de um certo período histórico”¹¹³. Por esse motivo, tem-se buscado ao longo de todo este trabalho desenhar o contexto do trabalho acústico de Ohm. E uma parte importante desse contexto é a aparição de “novos” instrumentos de produção de tons, a qual está inserida em um contexto maior dos estudos sobre o som e que ajudou a estimular a reflexão de Ohm sobre a essência de um tom. Em geral não se deu atenção suficiente a estes aparatos nos trabalhos históricos que tratam das pesquisas acústicas do estudioso, o que é mais um motivo para se abordar esta parte da história da acústica neste trabalho.

No que tange os estudos acústicos, pode-se dizer que, à época tratada, todo o processo que vai desde sua emissão, passando por sua transmissão até chegar ao receptor, era considerado mecânico. A emissão geralmente se realizava por meio da voz ou de algum corpo vibrante (cordas, tubos, membranas, bastões, sinos etc.), o meio poderia ser o ar ou a água e o receptor

¹¹² Explicar-se-á esse conceito posteriormente.

¹¹³ Ferraz, 51.

em geral era o ouvido humano. Neste contexto, havia três problemas maiores que os estudiosos em acústica do período buscavam resolver: 1) A obtenção de fontes de som cujas frequências podiam ser simplesmente controladas e medidas; 2) A necessidade de identificar a dependência desses sons em relação ao tempo e como eles percorriam o meio; 3) A necessidade de instrumentos que pudessem detectar o som de uma forma consistente e mensurável.¹¹⁴ Esta seção da presente tese lida com o contexto do primeiro problema, uma vez que trata de dois aparatos – a sirene e a roda dentada – desenvolvidos por estudiosos franceses com o intuito de produzir sons de forma controlada para suas pesquisas que então realizavam.

As cordas vibrantes, que tanto geraram controvérsias durante o século XVIII¹¹⁵, bem como os tubos pelos quais o ar passava produzindo um som de altura constante, continuaram a ser investigados durante o século XIX pelos estudiosos, como se pode verificar observando os conteúdos apresentados no livro *Repertorium der Physik*, que tinha como objetivo reunir as contribuições mais relevantes sobre a física da época, com o objetivo de instruir os novos pesquisadores germânicos.¹¹⁶ Porém, como será visto adiante, a concepção sobre a constituição dos tons será colocada em xeque e a forma como determinados estudos em acústica serão conduzidos por eles irá sofrer um impacto após a utilização de dois instrumentos que não tinham como objetivo produzir música, mas realizarem experimentos, a fim de estabelecer quantitativamente algumas explicações – a sirene de Cagniard e a roda dentada de Savart. Alguns trabalhos destes estudiosos acabaram por direcionar fortemente as pesquisas em acústica de seus vizinhos europeus, como será visto mais adiante.¹¹⁷

A questão de se os instrumentos eram novos ou não, ou seja, se Cagniard e Savart foram inventores, é controversa e por isso as aspas no título deste trecho da tese. A esse respeito, pode-

¹¹⁴ Beyer, *Sound of our times*, 27. Robert T. Beyer construiu sua carreira como físico, especializando-se na acústica, ou seja, não era propriamente um historiador da ciência e por isso sua visão histórica pode se mesclar um pouco com sua visão científica da área. Talvez seja por isso que tenha dividido sistematicamente os problemas históricos desta época em problemas em: 1) geração, 2) transmissão e 3) recepção do som. Além disso, ele não especifica o local, mas é provável que esteja se referindo aos estudiosos europeus.

¹¹⁵ As pesquisas relativas aos movimentos das cordas vibrantes no século XVIII desenvolveram-se muitas vezes em conjunto com as das teorias de equações diferenciais. Neste período, houve uma profusão destes trabalhos, bem como disputas entre os estudiosos acerca do tema. Sobre o assunto, cf. Darrigol.

¹¹⁶ No terceiro volume do livro, dentro da seção destinada à acústica aparecem os seguintes temas: tons de combinação e batimentos, oscilação em tubos cilíndricos, sons de vogais e assobios, oscilações de corpos elásticos dentre outros. Cf. Dove, *Repertorium der Physik* 3.

¹¹⁷ O estudioso germânico Friedrich Wilhelm Opelt (1794-1863) também fez pesquisas utilizando um aparato similar aos mencionados, porém seus trabalhos não chegaram a ser mencionadas por Ohm. Seus resultados foram publicados em 1834, quinze anos após a publicação de Cagniard e cinco anos após a publicação de Savart utilizando seus aparatos. Cf. Vogel, 263 e Robel, *Die Sirenen, Teil II*, 5-13. Ernst Robel era *Oberlehrer* e escreveu este livro em 1891, direcionado ao programa do *Realgymnasium* do antigo bairro de Luisenstadt, em Berlim. Sobre a posição de *Oberlehrer*, ver nota 67.

se mencionar que, próximo ao ano de confecção da sirene de Cagniard, foi publicado um trabalho do professor de física da Universidade de Edimburgo John Robison (1739-1805), e nele o autor menciona ter utilizado um aparato do tipo. Apesar de a publicação ter sido póstuma, o trabalho havia sido realizado no fim do século XVIII, de acordo com um recente trabalho¹¹⁸. Isso teria gerado uma disputa sobre quem teria inventado a sirene: os ingleses defendiam que teria sido Robison, os franceses, Cagniard.¹¹⁹ Já em relação à roda dentada, há registros de que o estudioso inglês Robert Hooke (1635-1703) teria produzido uma roda do tipo em 1676, com o objetivo de investigar vibrações musicais igualmente espaçadas (a qual ele dizia produzir sons musicais) e desigualmente espaçadas (a qual ele dizia produzir sons vocais).¹²⁰ A questão de saber quem tem a prioridade não é fundamental para este trabalho; se for levado em consideração que cada aparato tinha suas peculiaridades, a tarefa faz ainda menos sentido. O que interessa aqui é observar o que estava surgindo em relação às formas de produção destes sons (de altura constante) na época e o que os estudiosos pretendiam com elas. Robison, por exemplo, tinha por objetivo mostrar que, a propriedade de que a altura de um tom produzido por uma corda dependia do número de vibrações por segundo, ou seja, da sua frequência de vibração, era uma lei geral. Segundo ele, já havia sido mostrado que a mesma lei valia para tubos vibrantes por meio da passagem de ar. Para reforçar a sua ideia, portanto, ele desenvolveu experimentos com seu aparato e apresentou os resultados em seu livro¹²¹.

Nos parágrafos seguintes, serão abordadas partes dos trabalhos de Cagniard e de Savart com o objetivo de conhecer um pouco mais de seus instrumentos e suas intenções com eles. Não há aqui a intenção de fazer um estudo exaustivo de seus trabalhos, o que fugiria dos objetivos desta tese, mas sim construir, através do estudo destas fontes, o duto temporal mencionado na introdução desta tese. Adicionalmente, será possível conhecer melhor o contexto que Ohm produziu seus trabalhos em acústica, buscando uma melhor compreensão dos documentos que serão analisados.

Cagniard foi um engenheiro e físico nascido em Paris, em 1777. Educado na *École Polytechnique* e na *École du Génie Géographe*, inventou diversos aparatos com o objetivo de auxiliar suas investigações. Atuou no estudo do calor e da pressão sobre líquidos (o que estava diretamente relacionado à construção de motores a vapor), na determinação da quantidade de

¹¹⁸ Jackson, "From scientific instruments to musical instruments", 205.

¹¹⁹ Robel, *Die Sirenen, Teil I*, 12-13.

¹²⁰ Gouk, "The role of acoustics and music theory", 583. Inwood, *The man who knew too much*, 320.

¹²¹ Robison, *A system of mechanical philosophy*, 403-405.

vibrações necessária para a produção de um som de determinada altura, no estudo do mecanismo da produção da voz, no estudo da fermentação, dentre outras áreas. Sua biografia mostra que era um homem de vários interesses e estes foram mudando ao longo de sua vida.¹²² Para este trabalho de pesquisa, é interessante um feito que lhe trouxe bastante reputação: o desenvolvimento e a utilização de um aparato produtor de sons similares aos dos instrumentos musicais – a sirene.

Cagniard, em sua primeira investigação publicada em 1819, utilizando a sirene¹²³, afirmou que os físicos consideravam que os sons produzidos pelos instrumentos ocorriam por conta de choques sucessivos e regulares no ar produzidos pelas vibrações. Portanto, de modo recíproco, um som deste tipo poderia ser obtido por meio de um mecanismo que produzisse estes choques. Seguindo esta ideia, o estudioso desenvolveu tal mecanismo com o objetivo de gerar sons da espécie mencionada e com isso mensurar a quantidade de vibrações por segundo referente às notas musicais, aparato chamado por ele de *sirène*.¹²⁴ Sua ideia era usá-lo para produzir um som de mesma altura que um determinado instrumento musical (no caso, a harmônica) e efetuar a contagem das vibrações por meio da sirene. Por meio deste procedimento, Cagniard obteve, assim, a quantidade de vibrações para cada uma das notas entre lá e ré. Para a nota lá, por exemplo, o estudioso obteve o número de 427 vibrações por segundo.

A componente principal da sirene consistia em um disco feito de papel grosso ou folha de flandres que possuía uma sequência de furos igualmente espaçados sobre os quais era lançado um jato de ar contínuo por meio de um bico e que, quando colocado em rotação, produzia um tom (ver Figura 2)¹²⁵. Pode-se observar o disco da sirene, anotado na ilustração como “s”, sobre uma câmara, designada por “A A”, à qual é conectada um fole, anotado como “B B” (ver Figura 3).

¹²² Payen, “Cagniard de la Tour”, 8.

¹²³ De la Tour.

¹²⁴ Traduzido para o português, o nome dado por Cagniard ao aparato é sereia. Ele assim o fez, uma vez que o instrumento também era capaz de produzir notas (cantar) embaixo d’água: “Si l’on fait passer de l’eau dans la sirene, au lieu d’air, elle produit également le son, lors même qu’elle est entièrement immergée dans ce fluide, et les mêmes nombres de chocs produisent les mêmes notes que par l’air. C’est à cause de cette propriété d’être sonore dans l’eau, que j’ai cru pouvoir lui donner le nom sous lequel elle est désignée.” De la Tour, 171.

¹²⁵ As figuras aqui apresentadas, bem como uma descrição mais detalhada das sirenes de Cagniard de la Tour e de Seebeck, encontram-se no livro intitulado *Die Lehre von den Tonempfindung als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*, cuja primeira versão foi publicada em 1863 pelo estudioso Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894). Nesta tese foi utilizada como referência, no entanto, a terceira edição da versão inglesa do trabalho (1895) traduzida por Alexander J. Ellis. Cf. von Helmholtz, *On the sensations of tone*, 11-13.

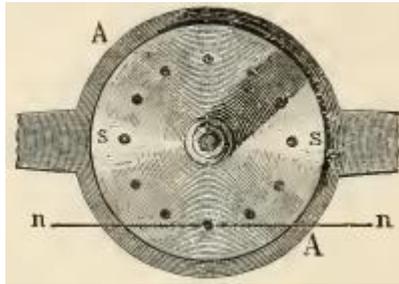


Figura 2: Disco da sirene visto por cima.

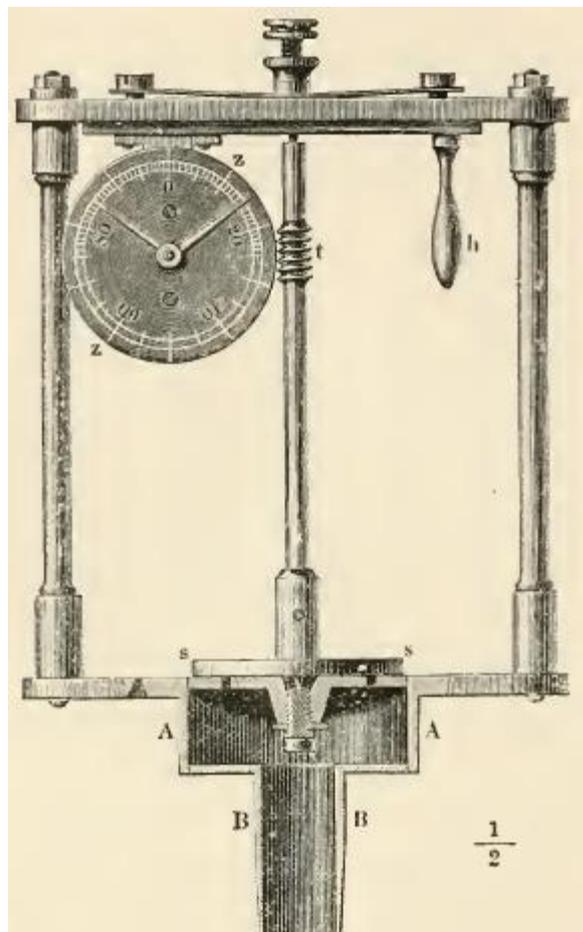


Figura 3: Uma das sirenes de Cagniard de la Tour

A sirene desta última figura parece ser apenas um dos vários tipos produzidos por Cagniard. Variações nos tamanhos dos furos, no distanciamento entre eles e no número de

discos teriam sido realizadas para diferentes propósitos, bem como a inclusão de contadores e outras partes em momentos posteriores. Dentre os propósitos mencionados, é possível citar a medição da altura do som emitido por um inseto voador, da velocidade do vento e pesquisas em relação à voz.¹²⁶

Os estudiosos germânicos da acústica demoraram para reconhecer os trabalhos de Cagniard de la Tour, o que só foi ocorrer na metade da década de 30 do século XIX, embora a invenção da sirene tenha sido realizada antes de 1819. O estudioso francês Pierre Louis Dulong (1785-1838), que mantinha contato com o professor de física Georg Wilhelm Muncke (1772-1847), de Heidelberg, parece ter sido um dos responsáveis por chamar a atenção dos estudiosos germânicos para o aparato de Cagniard.¹²⁷ Além disso, o livro *Précis élémentaire de physique expérimentale*, vol. 2 (Paris, 1817), do estudioso francês Jean-Baptiste Biot (1774-1862), que trazia uma descrição da sirene, foi traduzido para o alemão e editado pelo germânico Gustav Theodor Fechner (1801-1887) entre os anos de 1828-29, o que provavelmente acabou auxiliando a entrada do aparato em meios germânicos.¹²⁸

Em seu famoso livro de 1863, von Helmholtz, ao elencar quais seriam as três propriedades de um tom musical (força, altura e qualidade) e descrevê-las, mencionou o aparato que teria sido utilizado por Seebeck com o objetivo de compreender melhor como o ouvido percebia determinados sons. De acordo com a descrição de von Helmholtz, o aparato funcionava de forma semelhante à sirene de Cagniard e por isso von Helmholtz também refere-se a ela como sirene, embora a de Seebeck seja descrita e representada como mais simples do que a de Cagniard no livro de von Helmholtz.¹²⁹ O que é possível observar na figura exibida pelo estudioso no mencionado livro é um disco com furos formando duas circunferências concêntricas, o qual era rotacionado por intermédio de uma corda (denotada na Figura 4 por “f”). Durante esta rotação, um tubo (denotado na Figura 4 por “c”) soprava ar continuamente, o

¹²⁶ Robel, *Die Sirenen – Teil I*, 16-18. Uma descrição mais detalhada das sirenes e dos experimentos de Cagniard encontra-se em Robel, *Die Sirenen – Teil I*, 10-24.

¹²⁷ Jackson, *Harmonious triads*, 172, 323.

¹²⁸ Robel, *Die Sirenen – Teil II*, 3. O pesquisador Myles Jackson, no entanto, afirmou que a primeira descrição séria da sirene de Cagniard teria aparecido em 1838, relacionada ao fornecimento de um tom de altura constante para a construção de pianos e órgãos em Kützing, *Beiträge zur praktischen Akustik*. Cf. Jackson, “Physics and music”, 321 (nota 51).

¹²⁹ Von Helmholtz, 11-13. De maneira mais específica, o estudioso mencionou o aparato quando abordou a propriedade da altura de um tom, que poderia ser determinada com exatidão utilizando-se a sirene, o que resolveria os problemas que os físicos enfrentavam.

que gerava um som cuja altura dependia do número de furos e da velocidade de rotação do disco.¹³⁰

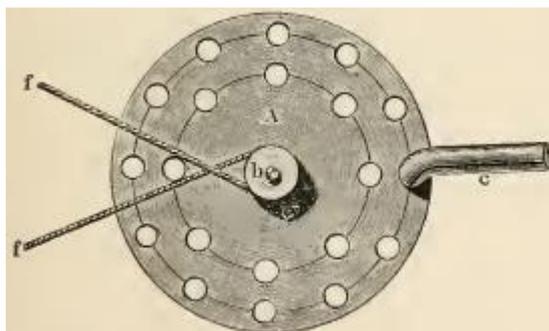


Figura 4: A sirene de Seebeck, de acordo com von Helmholtz.

Os resultados obtidos por Seebeck utilizando sua sirene foram publicados no artigo “Beobachtungen über einige Bedingungen der Entstehung von Tönen” (Observações sobre algumas condições da formação de tons), que teria causado sensação nos círculos de estudiosos de física da época, vinte e dois anos após os experimentos de Cagniard na França.¹³¹ Possivelmente também por conta desse destaque, este trabalho acabou motivando Ohm a desenvolver sua pesquisa sobre a definição de um tom, cujos resultados foram publicados em seu artigo de 1843. Porém, o desenvolvimento de um outro instrumento, que possuía algumas similaridades com o anterior, também viria a ser importante neste processo, uma vez que se juntaria à sirene em relação à forma que o tom era gerado (por impulsos sequenciais, diferentemente das formas usuais) e por isso ele será abordado a seguir. Este instrumento é a roda dentada, a qual foi utilizada por Savart também para realizar experimentos relacionados ao som.

Savart foi um estudioso francês nascido na cidade de Mézières que investigou diversos fenômenos vibratórios, em particular os relacionados ao som, embora tivesse estudado medicina no hospital militar em Metz e depois na Universidade de Strasbourg. O estudioso se interessou pela física do violino e pelos modos de vibração de pratos e de colunas de ar, o que

¹³⁰ Caso seja o interesse do leitor, Robel fez uma descrição mais detalhada da sirene de Seebeck em seu livro sobre as sirenes. Cf. Robel, *Die Sirenen – Teil II*, 13-14.

¹³¹ Seebeck, “Beobachtungen”; Robel, *Die Sirenen – Teil II*, 14. O trabalho de Seebeck será abordado mais a seguir, após a seção sobre a relação som/calor de Fourier.

lhe rendeu pesquisas sobre estes temas, além de ter-lhe encaminhado para o estudo da estrutura de determinados materiais. Também estudou magnetismo e nessa área é conhecido pela lei de Biot-Savart.¹³²

A parte da pesquisa de Savart que está diretamente relacionada a esta tese diz respeito à roda dentada, um aparato que ele utilizou em estudos sobre o som. Esta roda era feita de metal e colocada para girar em torno de um eixo por meio de uma outra roda acionada por uma manivela e uma polia. Em contato com os dentes da roda, era colocada uma espécie de cartão, cujo atrito gerado pelo movimento produzia um som de uma determinada altura, que dependia da quantidade de dentes e da velocidade em que era rotacionada.¹³³ Tal instrumento foi desenvolvido por Savart para que, através de experimentos, pudesse identificar os limites de audição de um ouvido humano¹³⁴.

Assim como Cagniard, Savart também teria produzido diferentes versões de seu aparato, de acordo com as necessidades de suas investigações.¹³⁵ É importante que seja mencionada essa questão para que não se tenha uma ideia demasiado simplista de seu aparato, sem, contudo, haver necessidade de abordar todo o trabalho em que o estudioso o utilizou, o que demandaria um tempo de pesquisa maior do que o disponível, além de causar um distanciamento dos propósitos deste trabalho. É curioso notar que o professor Robel também chamou o aparato de Savart de sirene, que é como Cagniard nomeou os seus, o que deve ter ocorrido pelo fato de o autor ter enxergado similaridades entre eles.¹³⁶ Possivelmente, para ele, a forma descontínua de produção de tons era o que os aproximava e ao mesmo tempo os diferenciava dos demais modos de geração sonora.

¹³² Dostrovsky, “Félix Savart”, 129.

¹³³ Savart apud Ulmann, *Chladni und die Entwicklung der Akustik*, 169.

¹³⁴ Como Greenslade observou em “The Siren”, 419, Savart teria utilizado também uma sirene similar às sirenes de Cagniard de la Tour para investigar esta questão.

¹³⁵ Robel o chamou de *Zahnrad sirene*, cuja tradução literal seria sirene de engrenagens. Cf. Robel, *Die Sirene – Teil I*, 24.

¹³⁶ *Ibid.*, 25-26.

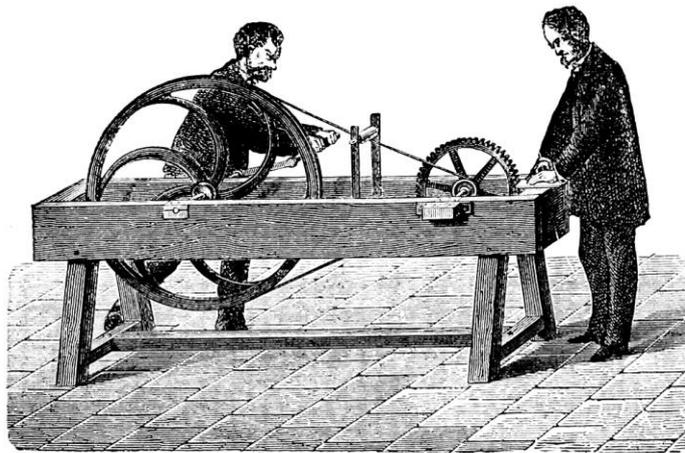


Figura 5: A roda dentada de Savart.¹³⁷

Os experimentos realizados por Cagniard de la Tour e Savart chamaram atenção para formas de produção de tons que não haviam sido tão estudadas quanto as geradas pelas cordas (dos instrumentos de corda em geral) e pelos tubos vibrantes (dos instrumentos de sopro ou do órgão) no século XVIII. Roeber, tratando dos estudos sobre o fenômeno dos batimentos, chama a atenção para estes trabalhos:

Para este objetivo, é permitido mencionar os conhecidos experimentos de Cagniard de la Tour e de Savart sobre a produção dos tons. Nós procuramos as semelhanças desses experimentos, tanto aqueles de Savart sobre os tons mais graves e agudos audíveis, quanto aqueles de Cagniard de la Tour, no que concerne o uso da sirene, e, assim, encontramos que a produção do tom somente se daria através da repetição regular de algum impulso tendo efeito sobre o ouvido, sendo que em todos os casos há a mesma dependência entre a altura do tom e o número de impulsos ocorrendo em um segundo.¹³⁸

Roeber, portanto, via semelhanças na forma que a sirene de Cagniard e a roda dentada de Savart produziam seus tons, mas não as comparou com as formas que os corpos elásticos e os tubos produziam os seus. Entretanto, Ohm, em seu artigo de 1843, citando este mesmo trecho de Roeber e um outro do mesmo trabalho, argumentou que elas eram diferentes e isso contribuiu

¹³⁷ Ullmann, *Chladni und die Entwicklung der Akustik*, 169.

¹³⁸ Roeber, 30-31.

para seu questionamento a respeito do que definiria um tom.¹³⁹ Seebeck concordou com Ohm a respeito de haver diferença entre os tons produzidos quando cita a sirene e a roda dentada em seu trabalho sobre a formação dos tons¹⁴⁰. Para Seebeck, as naturezas das ondas produzidas por um corpo elástico vibrante e uma sirene, por exemplo, não eram totalmente iguais. Por este motivo, o estudioso deixou claro que os resultados que apresentou a respeito da sirene não eram necessariamente válidos para outro tipo de produção de tons.

Esta diferenciação é provavelmente apontada pelo fato de os estudiosos da época verem as então mais usuais formas de produção de tons (cordas, tubos etc.) como geradoras de tons de maneira contínua, enquanto a sirene e a roda dentada como geradoras de tons de maneira descontínua, embora o resultado auditivo ainda fosse um som contínuo.¹⁴¹ Ou seja, no primeiro caso não haveria interrupções na vibração dos corpos, enquanto no segundo, a passagem de ar pelos furos da sirene ou o atrito entre o cartão e os dentes da roda seriam espaçados por pequenos intervalos de tempo. A constatação desta diferença deve muito provavelmente ter vindo pela forma com que estes aparatos foram construídos, além da percepção auditiva dos impulsos formadores de um tom. Essa questão fez com que os estudiosos da época começassem a pensar no que de fato definiria um tom, ou seja, do que eram constituídos. Seriam eles formados por movimentos senoidais como as cordas e os tubos vibrantes, por exemplo?¹⁴²

Para investigar essa questão, Ohm utilizou um teorema muito conhecido em sua época, cuja prova Fourier apresentou em seu livro publicado em 1822, no contexto de estudos sobre a propagação de calor em corpos sólidos.¹⁴³ No entanto, a ideia do teorema, ou seja, o desenvolvimento de uma determinada função em somas de senos ou cossenos com argumentos múltiplos de uma determinada quantidade, teria aparecido em trabalhos anteriores e em trabalhos de outros estudiosos¹⁴⁴. Desta maneira, é conveniente observar alguns pontos nas pesquisas de Fourier que estão ligados às pesquisas sobre cordas vibrantes, tanto pelo fato de Fourier ter tido como referência algumas destas pesquisas quanto pelo estudioso ter explicitamente se referido a uma ideia importante em seus trabalhos, da qual será tratada a

¹³⁹ Ohm, 513-514.

¹⁴⁰ Seebeck, “Beobachtungen”, 417.

¹⁴¹ A pesquisadora Holly Ingleton e o pesquisador Stephan Vogel também chamaram a atenção para a oposição continuidade-descontinuidade ao tratar da competição entre Seebeck e Ohm sobre a definição de tom. Cf. Ingleton, “Recalibrating Fundamentals of Discipline”, 72-73 e Vogel, 263.

¹⁴² Vogel, 263.

¹⁴³ Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*.

¹⁴⁴ Darrigol. Ao longo do trabalho, o autor foi mostrando que esta ideia estava presente em diversos estudos da época (e anteriores).

seguir. Isto auxiliará na compreensão das bases que possibilitaram Ohm utilizar esta ferramenta matemática em um contexto aparentemente distinto daquele em que ela foi originalmente desenvolvida.

2.2 Fourier e a relação som/calor

A ideia da representação de uma função por meio de somas de senos ou cossenos com argumentos múltiplos de um dado número, presente na série de Fourier, está diretamente relacionada a outra que se desenvolve no contexto dos estudos sobre cordas vibrantes no século XVIII. Esta última foi chamada pela historiografia de princípio da superposição dos modos simples de vibração de uma corda ou simplesmente princípio da superposição¹⁴⁵. É conveniente se fazer, neste momento, uma breve exposição deste conceito, antes de propriamente abordar a relação entre som e calor na visão de Fourier, para melhor entendimento do processo que se deu até o trabalho de Ohm sobre a definição de tom.

Para a compreensão de tal ideia, é importante entender dois outros conceitos que foram construídos ainda antes destes estudos sobre as cordas vibrantes e que já apareciam como bastante aceitos no século XVIII à época de D. Bernoulli e seus contemporâneos: as ideias de tom harmônico e dos modos de vibração de uma corda.¹⁴⁶ A ideia de tom harmônico surgiu a partir da percepção de músicos práticos e de estudiosos de que juntamente com um tom gerado, por exemplo a partir de uma corda, era possível ouvir outros simultaneamente, embora geralmente com uma intensidade menor. Já os modos de vibração eram os formatos que as cordas assumiam quando vibravam em uma determinada velocidade, de conforme se concluiu. Por exemplo, se uma corda com determinada quantidade de vibrações (por unidade de tempo) vibrasse como na Figura 6, a mesma corda com uma quantidade de vibrações 5 vezes maior vibraria como na Figura 7. Algo análogo aconteceria com qualquer outro múltiplo da

¹⁴⁵ Lindsay, “The story of acoustics”, 632; Kromhout, 483; Turner, 3. Turner fez um acréscimo, referindo-se à ideia como “princípio da superposição não perturbada”, dando ênfase à condição de que a vibração de cada modo não teria influência alguma sobre a do outro.

¹⁴⁶ O período referido situa-se a partir de meados do século XVIII, momento em que as cordas vibrantes estavam sendo bastante investigadas física e matematicamente.

quantidade inicial de vibrações. Deste modo, surgiriam pontos imóveis na corda, batizados por Sauveur de *noeuds* (nós).

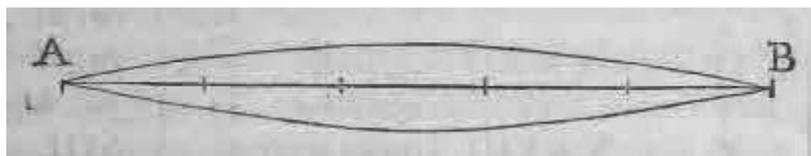


Figura 6: uma corda vibrante (1º modo de vibração). Os pontos A e B são os chamados nós da corda neste modo.¹⁴⁷

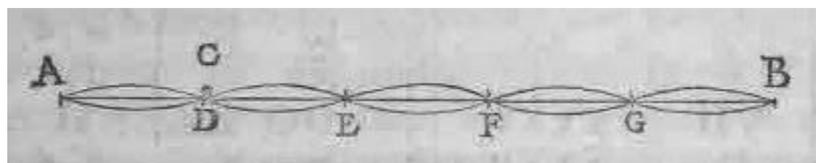


Figura 7: a mesma corda vibrando com uma quantidade de vibrações 5 vezes a da anterior (5º modo de vibração). Os pontos A, C=D, E, F, G e B são os nós da corda neste modo.

De acordo com Olivier Darrigol, Sauveur teria realizado suas investigações e desenvolvido as ideias acima mencionadas na busca de explicar a existência dos sons simultâneos emitidos por uma corda e teria imaginado que a corda vibraria de vários modos simultaneamente. A visão de Darrigol é similar a de Robert Lindsay, exposta em um trabalho mais antigo, mais especificamente cerca de 40 anos antes.¹⁴⁸ Explicando melhor a interpretação dos autores: a ideia é que as cordas vibrariam não somente em um modo de vibração de cada vez, mas em vários modos simultaneamente, cada um destes sendo responsável pela produção de um pequeno som que podia ser ouvido juntamente com o principal, sendo este mais grave e os outros, mais agudos. A interpretação faz sentido considerando-se a motivação das investigações de Sauveur, embora seja importante frisar que ele não explicita a ideia, o que seria feito em um momento posterior por outro pesquisador.

Quem assim o fez é D. Bernoulli, partindo dos resultados de Sauveur sobre os modos de vibração. D. Bernoulli propôs que um modo estaria fisicamente apoiado sobre o outro sem

¹⁴⁷ As duas figuras foram extraídas do trabalho Sauveur, *Principes d'acoustique et de musique*, 53.

¹⁴⁸ Darrigol, 348-349; Lindsay, 632.

que se atrapalhassem, daí o nome de princípio da superposição dado pela historiografia¹⁴⁹. Esta construção foi expressa pelo estudioso em termos matemáticos, e uma das expressões utilizadas lembra bastante a chamada série de Fourier que viria a aparecer anos depois em um outro contexto, o de estudos sobre o calor.

O trabalho de D. Bernoulli gerou muitas controvérsias, principalmente Euler e D'Alembert, mas também com outros estudiosos; porém ao longo da segunda metade do século XVIII, com o desenvolvimento das formas de lidar com o problema do movimento de uma corda, a ideia da superposição foi se consolidando.¹⁵⁰ A soma de soluções de uma determinada equação diferencial era também muitas vezes solução desta equação, tendo esta soma envolvido muitas vezes funções senoidais, caso em que se produziria uma solução geral parecida com a função que D. Bernoulli propôs para representar uma corda vibrante e seus vários modos de vibração. É muito provável que esta situação tenha contribuído para a consolidação da ideia da superposição proposta pelo estudioso.

Outros trabalhos podem ajudar a compreender o contexto das discussões sobre acústica. Por exemplo, na virada do século XVIII para o XIX, situam-se os trabalhos acústicos de Ernst Florenz Friedrich Chladni (1756-1827), considerados por muitos um marco na história da acústica. Praticamente todo o trabalho de Chladni teria sido realizado sobre acústica, dentro do qual destaca-se o trabalho feito com placas vibrantes cobertas de areia para exibir os modos (padrões) que se formavam. O estudioso resolve entrar neste tema, uma vez que para ele as vibrações das placas ainda não haviam sido entendidas, enquanto as das cordas sim. Como resultado, obteve resultados análogos aos modos de vibração das cordas, porém bidimensionalmente.¹⁵¹

Estudiosos germânicos, ingleses e principalmente os franceses interessaram-se por seu trabalho¹⁵², ajudando a consolidar os resultados dos estudos sobre a vibração das cordas do século XVIII. Isso porque os estudos das placas vibrantes acabaram indo para um caminho

¹⁴⁹ D. Bernoulli não chamou sua explicação de princípio e nem de superposição, mas o termo princípio da superposição é provavelmente utilizado para facilitar a referência à ideia. Porém, o termo dá a ideia de um ponto de partida para algo, o que não parece ter sido o caso. Como D. Bernoulli construiu e utilizou esta ideia para explicar os sons simultâneos ouvidos em uma corda vibrante e outros objetos produtores de tons, outro termo poderia expressar de forma mais adequada as intenções por trás da ideia: teoria da superposição. Por simplicidade, referir-se-á à explicação dada por D. Bernoulli somente como superposição.

¹⁵⁰ A respeito de tais controvérsias, cf. Truesdell, *The rational mechanics* e Darrigol.

¹⁵¹ Dostrovsky, "Chladni", 258.

¹⁵² *Ibid.*, 258.

similar, ou seja, buscavam a descrição dos fenômenos por meio de uma matemática que resultaria em uma equação diferencial.¹⁵³

Após esta breve introdução sobre conceitos acústicos pertinentes e sobre o contexto dos estudos sobre o som, estão dadas as condições para analisar o que Fourier mencionou direta ou indiretamente sobre a superposição. Como seu trabalho é fonte direta do principal trabalho de Ohm sobre acústica, além de haver outras evidências de que os trabalhos de Fourier foram relevantes para a elaboração dos próprios trabalhos de Ohm, essa análise faz-se necessária para melhor compreensão do que teria motivado Ohm a utilizar a série de senos e cossenos em seu artigo acústico de 1843.¹⁵⁴ De fato, há diversos momentos nos trabalhos de Fourier em que a superposição é mencionada, geralmente citando os trabalhos sobre as cordas vibrantes.¹⁵⁵

Fourier nasceu em 1768, em Auxerre (França), filho de um alfaiate, porém perdeu seus pais prematuramente aos nove anos. Ainda assim, com a ajuda de um arcebispo, conseguiu prosseguir seus estudos até chegar em 1795 à École Polytechnique como professor assistente, auxiliando as aulas de Lagrange e Gaspard Monge (1746-1818), dois matemáticos proeminentes à época. Neste período, foi indicado por Monge para a campanha egípcia de Napoleão. Ao retornar para a França, queria retomar seu trabalho na *Polytechnique*, porém Napoleão, reconhecendo suas habilidades administrativas, o nomeou para prefeito do departamento de Isère, centrado em Grenoble. Por causa de seu sucesso administrativo, em 1808 Napoleão conferiu a ele um baronato. Foi em meio a estas atividades que Fourier desenvolveu suas primeiras pesquisas em física.¹⁵⁶

Seu primeiro trabalho teria sido sobre estática (1798) no qual Fourier tratou da estabilidade do equilíbrio e afirmou que esta dependia de pequenos movimentos em seu entorno.¹⁵⁷ Fourier também afirmou que, de acordo com a análise desta questão por Lagrange, seria possível demonstrar “uma proposição importante que D. Bernoulli foi o primeiro a descobrir e provar para diversos casos particulares: as pequenas oscilações dos corpos se

¹⁵³ É interessante também notar que a vibração dos pratos também foi estudada por Savart.

¹⁵⁴ Cf. Caneva, “Georg Simon Ohm”, 187-188, 192; Lommel, “The scientific work”, 251; Gee, “Georg Simon Ohm 1789-1854”, 111.

¹⁵⁵ O artigo de Olivier Darrigol sobre as origens da análise harmônica servirá de auxílio para a localização destes momentos, possibilitando o desenvolvimento de algumas reflexões sobre eles. Cf. Darrigol.

¹⁵⁶ Ravetz, “Joseph Fourier”, 93.

¹⁵⁷ Darrigol, 401.

compõem de oscilações simples que acontecem ao mesmo tempo, sem se destruírem”.¹⁵⁸
Quando se referiu a corpos em contato, Fourier afirmou que:

Dessa forma, sem nossos sentidos, apenas o cálculo nos informaria a coexistência de vibrações simples, e por assim dizer, da composição harmônica das oscilações.

Os resultados que acabamos de expor são observados em toda espécie de matéria. A natureza reproduz tais fenômenos sob as mais variadas formas: são observados particularmente nos tremores dos corpos sonoros; e é um ramo do Cálculo Integral que fornece os princípios fundamentais da harmonia.¹⁵⁹

Estes trechos mostram como a ideia da superposição já se fazia presente nos trabalhos de Fourier desde o primeiro, que ainda não era sobre o calor. Pelo fato de aparecer em contextos diferentes, fica evidente que era uma ideia um tanto abstrata, utilizável para explicar diferentes tipos de fenômenos.

A relação som/calor em Fourier apareceria no que é considerado seu primeiro trabalho sobre a propagação do calor: um esboço escrito em 1805/1806. Inspirado em Lagrange que, em seu *Mécanique analytique*, havia abordado o problema referente à vibração de uma corda elástica carregada de forma discreta (ou seja, com massas pontuais), Fourier tratou da questão da troca de calor entre uma quantidade n de massas pontuais, iguais, equidistantes e arranjas linearmente. A relação som/calor teria vindo do fato que as equações diferenciais que descreviam os fenômenos eram parecidas. Problemas diferentes, mas que levaram a equações similares. Por este motivo, Fourier teria seguido o procedimento de Lagrange para resolver a equação diferencial e obtido soluções com forma exponencial, as quais ele somou (superpôs) na busca de uma solução geral.¹⁶⁰ Esta solução, apesar de não ter formato senoidal, é também uma composição (soma) de soluções, além de provir de um modelo parecido com o da corda vibrante. Em estudos posteriores, Fourier se aproximou cada vez mais do resultado mais tarde utilizado por Ohm.

Ainda neste esboço, ao tratar da propagação de calor ao longo de uma lâmina retangular semi-infinita (infinita somente para a direita ou para a esquerda e finita no sentido oposto),

¹⁵⁸ Fourier, “Mémoire sur la statique”, 507.

¹⁵⁹ Ibid., 520-521.

¹⁶⁰ Darrigol, 405-407.

Fourier imaginou uma decomposição do fluxo de calor em modos, tais como os das cordas vibrantes, possivelmente por analogia.¹⁶¹ Em relação às cordas, esta ideia da composição/decomposição por meio dos modos de vibração era mais antiga, apesar de controversa.¹⁶² Já em relação à propagação de calor, a ideia parece ser mais nova. Fourier afirmou que

Imagina-se que o calor que chega a cada instante da fonte divide então a si mesmo em porções distintas, que se propagam de acordo com uma das leis elementares mencionadas e que todos estes movimentos parciais ocorrem sem atrapalhar um ao outro.¹⁶³

Esta ideia é basicamente a superposição transposta para o contexto da propagação de calor. O trecho refere-se à questão física, porém possivelmente foi motivada por seus resultados matemáticos obtidos, o que não é de se espantar, uma vez que as ideias positivistas estavam se desenvolvendo à época, como será discutido mais adiante.

Fourier publicou um outro trabalho em 1807, no qual ele seguiu obtendo novas derivações de desenvolvimentos das funções em séries de senos e cossenos de argumentos múltiplos. O estudioso teria se valido de alguns resultados já utilizados por Euler e Lagrange no problema da corda carregada discretamente. Fourier via seus resultados como uma confirmação da opinião de D. Bernoulli.¹⁶⁴ Esta visão é interessante, pois mostra que Fourier, apesar de ter desenvolvido trabalhos sobre o calor, mantinha em mente os trabalhos sobre as cordas vibrantes.

Em uma apresentação oral para acadêmicos franceses em 1807, Fourier fez uma interessante analogia entre o calor e o som. Em resumo, ele tratou a distribuição de calor em um corpo como os harmônicos de uma corda, defendendo que o primeiro também era constituído de modos simples que se propagam sem atrapalhar uns aos outros. Outro ponto

¹⁶¹ Ibid., 408-409.

¹⁶² Os trabalhos de Darrigol e de Truesdell abordaram diversas controvérsias que surgiram acerca dos estudos das cordas vibrantes no final do século XVIII. Cf. Darrigol, 354-401 e Truesdell, 237-300.

¹⁶³ Fourier, “Mémoire sur la propagation”, folio 130, apud Grattan-Guinness, *Joseph Fourier 1768–1830*, 144.

¹⁶⁴ Fourier, Introdução a um esboço e Fourier, “Mémoire sur la propagation”, 250-251 apud Grattan-Guinness, *Joseph Fourier 1768-1830*, 183 apud Darrigol, 416.

interessante a se notar é que para ele, esta ideia não era puramente racional e analítica, mas os modos tinham uma existência física.¹⁶⁵

Após o desenvolvimento de outros trabalhos relacionados ao calor, Fourier publicou, em 1822, seu famoso livro *Théorie analytique de la chaleur*, por meio do qual iria consolidar suas investigações anteriores, bem como apresentar provas de seu teorema.¹⁶⁶ É importante analisar os pontos deste trabalho que estão relacionados ao objeto da presente pesquisa.

No discurso preliminar do livro, Fourier expôs um pouco de sua visão de ciência: “Causas primárias são desconhecidas para nós; mas são sujeitas a leis simples e constantes, as quais podem ser descobertas pela observação [...]”¹⁶⁷. Além disso, explicitou o objetivo do trabalho, que era de “estabelecer as leis matemáticas que este elemento [o calor] obedece.”¹⁶⁸ Consonantemente com essas ideias, mais tarde Auguste Comte (1798-1857) escreveria em seu Curso de Filosofia Positiva:

“[...] no estado positivo, o espírito humano, reconhecendo a impossibilidade de obter noções absolutas, renuncia a procurar a origem e o destino do universo, a conhecer as causas íntimas dos fenômenos, para preocupar-se graças ao uso bem combinado do raciocínio e da observação, suas leis efetivas, a saber, suas relações invariáveis de sucessão e similitude”.¹⁶⁹

Como é possível ver, portanto, havia similaridades nas formas de Comte e Fourier verem a ciência. Ambos acreditavam que não se deveria buscar as causas dos fenômenos, mas sim as leis imutáveis que regem estes fenômenos. Além de imutáveis, estas leis seriam também simples. Com seus trabalhos indo nesta direção, Fourier teria contribuído para o desenvolvimento do pensamento positivista francês, o que se pode concluir a partir das comparações entre os pensamentos de ambos os estudiosos. Ademais, para Comte, as pesquisas de Fourier eram um bom exemplo contemporâneo de trabalhos com caráter positivo:

¹⁶⁵ Fourier, *Face aux objections*, 55–56 apud Darrigol, 417.

¹⁶⁶ Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*. Nesta pesquisa, porém, será utilizada a tradução inglesa de Alexander Freeman, de 1878: Fourier, *The analytical theory of heat*.

¹⁶⁷ *Ibid.*, 1. Roeber também citou algo nesta direção quando falava sobre a teoria de tons de combinação de Hällström. Cf. Roeber, 7.

¹⁶⁸ Fourier, *The analytical theory of heat*, 1.

¹⁶⁹ Comte, *Curso de filosofia positiva*, 36.

[...] Para citar apenas neste momento um único dentre os trabalhos contemporâneos, escolherei a bela série de pesquisas do Sr. Fourier sobre a teoria do calor. Oferece-nos a verificação muito sensível das observações gerais precedentes. Neste trabalho, cujo caráter filosófico é tão eminentemente positivo, as leis mais importantes e precisas dos fenômenos termológicos se encontram desvendadas, sem que o autor tenha inquirido uma única vez sobre a natureza íntima do calor, sem que tenha mencionado, a não ser para indicar sua vacuidade, a tão agitada controvérsia entre os partidários da matéria calórica e aqueles que fazem consistir o calor em vibrações dum éter universal. No entanto, trata-se nessa obra das mais altas questões, muitas das quais nunca nem mesmo tinham sido colocadas, prova capaz de que o espírito humano, sem se lançar em problemas inalcançáveis, e restringindo-se a investigações de ordem inteiramente positiva, pode encontrar aí alimento inesgotável para sua atividade mais profunda.¹⁷⁰

Ver-se-á, mais adiante, que Ohm acabou adotando uma postura similar, mostrando sua influência de estudiosos franceses, mais especificamente dos trabalhos de Fourier. Por agora, retomar-se-á o livro de Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*.

No Capítulo III (Propagação do calor em um sólido retangular infinito) do livro, Seção VI (Desenvolvimento de uma função arbitrária em séries trigonométricas), Fourier afirmou que o problema de se desenvolver qualquer função em uma série infinita de senos e cossenos de arcos múltiplos estava conectado à teoria de equações diferenciais parciais e que era necessário resolver este problema de modo a integrar adequadamente as equações de propagação de calor.¹⁷¹ Inicialmente, denotou por $\phi(x)$ uma função cujo desenvolvimento contém somente potências ímpares da variável. Partindo da igualdade

$$\phi(x) = a \operatorname{sen} x + b \operatorname{sen} 2x + c \operatorname{sen} 3x + d \operatorname{sen} 4x + \dots, \quad (\text{Equação 1})$$

Fourier desenvolveu uma teoria para encontrar os coeficientes a, b, c, d , etc. Após a conclusão, ele passou a estender a teoria para encontrar os coeficientes no caso em que $\phi(x)$ é uma função arbitrária, podendo inclusive ser descontínua¹⁷², obtendo, por fim, a expressão

¹⁷⁰ Ibid., 44.

¹⁷¹ Fourier, *The analytical theory of heat*, 168.

¹⁷² Ibid., 184.

$$\frac{1}{2}\pi\phi(x) = \text{sen } x \int \text{sen } x\phi(x)dx + \text{sen } 2x \int \text{sen } 2x\phi(x)dx + \dots + \text{sen } ix \int \text{sen } ix\phi(x)dx + \dots, \text{ (Equação 2)}$$

em que as integrais são calculadas de $x = 0$ a $x = \pi$. As integrais $\int \text{sen } nx\phi(x)dx$ são os coeficientes de cada $\text{sen } nx$.¹⁷³ Desta maneira, se estas integrais são denotadas por a, b, c, d e assim por diante, vê-se que $\phi(x)$ é representada na mesma forma da Equação 1, ambas como uma soma de senos cujos argumentos são múltiplos de uma determinada quantidade.¹⁷⁴

Após obter a Equação 2, Fourier irá trabalhar no desenvolvimento de um resultado análogo, porém baseado em cossenos. Em seguida, tratou de alguns casos particulares da função $\phi(x)$, como por exemplo no caso em que ela era representada por partes. Por meio destes casos particulares apresentados, o estudioso foi construindo um resultado geral. Em um certo momento do trabalho, Fourier escreveu: “se aplicamos estes princípios ao problema do movimento das cordas vibrantes, podemos resolver dificuldades que apareceram primeiramente nas pesquisas de D. Bernoulli.”¹⁷⁵ Conforme mencionado anteriormente nesta pesquisa, em sua época, D. Bernoulli representara uma determinada função como soma de senos ou de cossenos na tentativa de explicar os sons harmônicos, os quais eram possíveis de serem ouvidos simultaneamente quando uma corda vibra e se deparara em seguida com objeções de Euler e D’Alembert.¹⁷⁶ Neste ponto do trabalho, Fourier afirmou que “a mais completa de todas as provas” do resultado de D. Bernoulli “consistia em verdadeiramente resolver uma dada função em uma tal série com coeficientes determinados”, conforme o desenvolvimento apresentado por ele.¹⁷⁷

Na realidade, Fourier não só estaria ciente como teria tido como referência pesquisas relativas às cordas vibrantes, as quais teriam contribuído significativamente para o

¹⁷³ Ibid., 185.

¹⁷⁴ É interessante observar que Lagrange obtivera uma expressão similar, provavelmente em um contexto diferente. Cf. Fourier, *The analytical theory of heat*, 185 (nota do tradutor).

¹⁷⁵ Ibid., 198.

¹⁷⁶ Em diferentes situações, Fourier demonstrou estar ciente de parte dos trabalhos sobre as cordas vibrantes realizados no século anterior, inclusive os mencionados. Cf. Darrigol, 401-424.

¹⁷⁷ Fourier, *The analytical theory of heat*, 198.

desenvolvimento das investigações do estudioso sobre a propagação do calor.¹⁷⁸ Há, desta maneira, uma influência de trabalhos acústicos sobre outros referentes à condução de calor.

Para Fourier, as equações que representam o movimento do calor, a vibração de corpos sonoros, bem como a oscilação dos líquidos eram ramos da análise, desta forma estando conectadas. Ele considerava a análise uma área importante que deveria merecer mais atenção.¹⁷⁹ Além disso, para o estudioso, a semelhança entre a teoria do calor e a dos sons musicais também poderia ser percebida por meio das sensações:

Os problemas da teoria do calor apresentam tantos exemplos de disposições simples e constantes que originam das leis gerais na natureza; e se a ordem que é estabelecida nestes fenômenos pudesse ser compreendida pelos nossos sentidos, ela produziria em nós uma impressão comparável à da sensação de um som musical.¹⁸⁰

A fala é mais uma evidência de que Fourier via ambos os fenômenos como próximos. Ohm não deixou claro em seus artigos sobre acústica sobre como ele enxergava este ponto, porém a utilização da série de Fourier no contexto da acústica é um indício de que o físico via alguma semelhança entre os fenômenos ou ao menos reconhecia a utilidade da análise matemática como ferramenta para a compreensão deles.

Na próxima seção, tratar-se-á de uma fonte ainda mais próxima temporalmente do artigo de Ohm sobre a definição de um tom: o artigo de Seebeck publicado em 1841. Este artigo tem relação direta com o contexto explorado na Seção 2.1 e traz resultados que instigaram Ohm a explicá-los por intermédio da série de Fourier como ferramenta matemática, questão que é o foco do presente trabalho.

¹⁷⁸ Cf. Darrigol, 401-424.

¹⁷⁹ Fourier, *The analytical theory of heat*, 6.

¹⁸⁰ *Ibid.*, 8.

2.3 Os experimentos de Seebeck

A. Seebeck foi filho de Thomas Johann Seebeck, conhecido por seus estudos em termoeletricidade. Nascido em Jena, estudou matemática e ciências da natureza na tradicional Universidade de Berlim. Um ano após a conclusão de seu curso, foi lecionar física no *Friedrich-Werderschen Gymnasium* e, em 1833, foi nomeado *Oberlehrer*¹⁸¹ da mesma disciplina no *Köllnischen Realgymnasium* em Berlim e na Escola de Guerra.¹⁸² Foi em meio a estas atividades que A. Seebeck realizou e publicou suas pesquisas a respeito do som.

Os resultados de Seebeck, que Ohm tentará explicar, foram publicados no artigo “Beobachtungen über einige Bedingungen der Entstehung von Tönen” (Observações sobre algumas condições do surgimento de tons), no *Poggendorfs Annalen*. No trabalho, Seebeck utilizou sua sirene para investigar algumas questões concernentes à produção de tons uma vez que, conforme mencionado, seu aparato permitia um controle interessante da altura deles, bem como a produção de uma variedade de situações diferentes. No início do artigo, Seebeck fez uma observação sobre os instrumentos utilizados por Cagniard e por Savart em suas pesquisas, já que, para ele, estes instrumentos podiam dar respostas que “as formas ordinárias de produção de tom” não dariam.¹⁸³ Em seguida, Seebeck ressalta que “as ondas que emanam destes aparatos não são exatamente da mesma natureza do que as ondas produzidas pela vibração de um corpo elástico”, e por este motivo os resultados obtidos por ele com a sirene não poderiam ser transferidos a outras formas de produção de tons.¹⁸⁴ Ohm, ao contrário, não fez este tipo de distinção, dizendo que iria verificar se a “antiga definição” serviria para estas formas, o que, com o desenvolvimento que apresenta em seu trabalho, é demonstrado que sim.

Seebeck foi cuidadoso e tinha motivos para isso. Um ano antes da publicação do trabalho de Seebeck, W. Weber havia se manifestado sobre a diferença dos tons produzidos

¹⁸¹ Ver nota 67.

¹⁸² Krause, “Seebeck”, 559.

¹⁸³ Seebeck, “Beobachtungen”, 417. O historiador da ciência Roy S. Turner afirmou que Seebeck teria introduzido vários melhoramentos na sirene de Cagniard de la Tour para a realização de experimentos posteriores. Cf. Turner, 2. Por outro lado, Roebel afirmou que os experimentos de Cagniard eram desconhecidos de Seebeck até um certo momento, ou seja, que a criação dos aparatos teria sido independente. Esta última afirmação parece fazer mais sentido, uma vez que, de acordo com as descrições das sirenes, não parece que a de Seebeck tenha sido baseada na de Cagniard, ao menos de início.

¹⁸⁴ Seebeck, „Beobachtungen“, 417. A distinção entre os tipos de ondas foi reforçada pelo estudioso na conclusão do trabalho. Cf. Seebeck, „Beobachtungen“, 435-436.

pelo monocórdio e pela sirene. Para W. Weber, no primeiro caso, havia uma alternância entre ondas expansivas e compressivas enquanto no segundo existia somente uma onda expansiva.¹⁸⁵ Ohm veria esta diferença como uma questão a ser verificada, um dos fatores que motivaria seu trabalho sobre a definição de tom, porém no fim acabou defendendo que ambas seguiam a mesma lei.

Após descrever o aparato utilizado, o qual ele afirmava ser uma sirene, Seebeck apresentou a questão principal que seria respondida por meio de seus experimentos: “o que surge quando duas ou mais sirenes dão o mesmo tom simultaneamente?”.¹⁸⁶ A partir daí, ele começou a exibir os resultados de seus experimentos um a um.

Não é objetivo desta pesquisa analisar exaustivamente o trabalho de Seebeck, uma vez que isto poderia ocasionar a perda de foco nos objetivos desta tese, mas sim apresentar um resumo de suas ideias a fim de contextualizar e compreender melhor o trabalho de Ohm sobre a definição de tom, além de trazer à tona e analisar uma de suas principais fontes.

O artigo de Seebeck é basicamente dividido em três partes: I) Interferência no sopro da sirene; II) Fenômenos com o isocronismo dos impulsos perturbado; e III) Os impulsos pertencentes a um tom podem originar alternadamente de diferentes pontos? Pretende-se aqui explicar resumidamente em que consiste cada uma destas partes, em especial as duas primeiras, as quais foram explanadas por Ohm a partir da ferramenta matemática da série de senos/cossenos de argumentos múltiplos.

A parte I trata de interferência de dois tons produzidos pela sirene. Em um caso, a sirene foi soprada por dois jatos de ar em sentidos opostos, podendo um tom cancelar o outro ou reforçá-lo, dependendo se fossem exatamente opostos ou se estivessem direcionados a buracos diferentes. No outro, foi utilizado um disco com dois círculos concêntricos de furos, nos quais um tinha o dobro do número de furos do outro. Normalmente neste caso ouviriam-se os dois tons, porém como os sopros eram efetuados em sentidos opostos, somente o tom grave era ouvido, uma vez que metade dos sopros eram “cancelados” nesse processo, restando somente

¹⁸⁵ Robel, *Die Sirenen – Teil II*, 4.

¹⁸⁶ Seebeck, „Beobachtungen“, 417.

o som produzido pelos sopros da outra metade dos furos.¹⁸⁷ Estes resultados seriam explicados por Ohm em seu artigo de 1843.

Já a parte II trata das pequenas variações nos tempos entre produção dos pulsos pela sirene. Em um isocronismo perfeito, os pulsos deveriam ser produzidos com um intervalo de tempo t entre todos eles (intervalo sempre igual). Um dos casos que Seebeck tratou é o de um tempo t entre o primeiro e o segundo pulso, um tempo t' entre o segundo e o terceiro, novamente um tempo t entre o terceiro e o quarto, novamente um tempo t' entre o quarto e o quinto e assim por diante, o que geraria a sequência alternada de tempos: $t, t', t, t' \dots$ Seebeck produziu esta situação se utilizando de diferentes espaçamentos entre os buracos da sirene. Como resultado, ele afirmou ser possível ouvir o tom de período $t + t'$, e quanto mais próximos estavam t e t' , mais se ouvia o tom de período $(t + t')/2$. Um resultado análogo seria obtido se a sequência fosse $t, t', t'', t, t', t'' \dots$ ¹⁸⁸ Esta simultaneidade de tons foi vista e explicada por Ohm como sendo harmônicos de um determinado tom mais complexo em seu artigo sobre a definição de tom, publicado em 1843, o qual será abordado mais adiante.

Na parte III, Seebeck exibiu resultados a respeito de observações referentes a tons produzidos em diferentes lugares, inclusive com direções diferentes. Ele reviu a ideia de Savart de que os tons não poderiam vir de diferentes pontos.¹⁸⁹ Estes resultados não estão na lista dos explicados por Ohm e por isso serão deixados de fora da presente análise, apesar de ocuparem a maior parte do artigo. Porém, há pontos interessantes de serem mencionados. Um deles é que Seebeck reproduziu, utilizando a sirene, uma das experiências de Savart com a roda dentada.¹⁹⁰ Por este motivo e pela forma como tratou os instrumentos no artigo, pode-se perceber que Seebeck os enxergava como bastante semelhantes. No entanto, pode-se destacar que a justificativa dada pelo estudioso por ter chegado à conclusão de que os tons poderiam originar de diferentes locais, resultado oposto ao de Savart, foi somente a questão da precisão. Ou seja, na visão de Seebeck, o fato de a sirene ser mais precisa teria possibilitado a ele corrigir a conclusão obtida por Savart.¹⁹¹

¹⁸⁷ Ibid., 419-421. Seria interessante apresentar as imagens dos instrumentos utilizados por Seebeck, mas o artigo não traz qualquer figura, expondo apenas a descrições dos aparatos. De toda forma, foi mostrado, anteriormente nesta tese, a imagem do instrumento de Seebeck publicado por Helmholtz.

¹⁸⁸ Ibid., 421-425.

¹⁸⁹ Ibid., 425, 429.

¹⁹⁰ Ibid., 426.

¹⁹¹ Ibid., 426.

Outro ponto interessante aparece na parte final do artigo, quando Seebeck, ao tratar da produção da oitava gerada por meio da emissão de dois tons “harmônicos”, realizou a soma algébrica de duas senoides, o que lembra uma parte da série de Fourier, embora as apresentadas por Seebeck não tivessem argumentos múltiplos, mas sim iguais, o que representaria oscilações de ar de mesma frequência. Como resultado, Seebeck obteve uma outra senoide, cuja frequência de oscilação permanecia a mesma, o que mostraria que a oitava, cuja frequência é o dobro, não poderia aparecer. Ele deixou claro, também, que a forma da onda resultante da soma (que representa a propagação simultânea das duas ondas), era a mesma das duas ondas que a produziam.¹⁹² Esta ideia é bastante interessante, pois, juntamente com o trecho mencionado anteriormente do trabalho de Roeber, mostra como a ideia da soma algébrica das curvas senoidais estava presente na época dentro dos estudos sobre o som, o que é mais um motivo para Ohm ter feito uso da série como ferramenta de análise de um tom qualquer.

Ao longo do presente capítulo, tratou-se dos instrumentos de produção de tons que movimentaram os estudos sobre o som da época em questão, causando dúvidas nos estudiosos, uma vez que eles pareciam produzi-los de uma forma diferente dos meios mais usuais da época. Cagniard, Savart e Seebeck contribuíram, cada qual realizando suas investigações para se criar um movimento interessante em se tratando dos estudos sobre o som. Viu-se, adicionalmente, que a mesma ideia estava presente em estudos de Fourier sobre o calor, de uma forma não somente algébrica, mas também por meio de algumas falas do estudioso a favor da presença de uma sobreposição (física) de modos de oscilação independentes entre si. Ao mesmo tempo que se abordou as fontes, foi possível também situar o contexto em que se insere o artigo de Ohm sobre a definição de tom. Desta maneira, será possível, deste ponto em diante, construir o duto temporal mencionado anteriormente¹⁹³ e, deste modo propiciar uma melhor compreensão sobre o que possibilitou Ohm empregar uma ferramenta utilizada e aparentemente desenvolvida no contexto de estudos de calor no contexto da acústica.

Capítulo 3. A definição de tom

¹⁹² Ibid., 434.

¹⁹³ Alfonso-Goldfarb et al, “Uma ,viagem’ entre documentos e fontes”.

No Capítulo 1 foi tratado sobre o contexto que Ohm desenvolveu suas pesquisas e sobre sua formação, o que permitiu a investigação das ideias que estavam sendo debatidas e de quais delas o estudioso estava se apropriando. O embate com Pohl, que afirmava que Ohm não teria prestado atenção à “essência” do circuito e a proximidade do pensamento de Ohm com o de Fourier sobre buscar leis gerais e simples, assim como a utilização da matemática para tal fim, são sinais de uma mudança em curso na forma de alguns estudiosos germânicos conduzirem suas pesquisas.

O Capítulo 2, por seu lado, abordou os “novos” instrumentos de produção de som da época, que viriam a colocar em xeque uma tradição estabelecida, a qual incluía as funções senoidais e a ideia de que um corpo vibrante se movimentava por meio de modos de vibração superpostos. Ademais, abordou, com mais profundidade, algumas ideias de Fourier, às quais Ohm mostrava estar alinhado por meio de sua postura frente aos problemas que atacou. Esse alinhamento, inclusive, está inserido no intercâmbio mais geral de estudiosos franceses e germânicos tratado anteriormente.

O presente capítulo tem por objetivo abordar o artigo de 1843 de Ohm sobre a definição de tom e analisá-lo à luz das ideias tratadas nos capítulos anteriores. Mais especificamente, a ideia é expor o que teria permitido que Ohm retirasse a série de senos e cossenos dos estudos sobre o calor de Fourier e a utilizasse para investigar os tons produzidos pela sirene. Os argumentos desta tese giram em torno de três principais pontos: 1) a defesa de uma tradição estabelecida com base nos estudos das cordas vibrantes do século XVIII; 2) a busca por leis gerais e simples, muitas vezes conectando áreas diversas do conhecimento e indo em direção a teorias mais gerais, unificadoras; e, 3) a influência de Fourier e de outros estudiosos franceses. Os trabalhos destes estudiosos parecem ter trazido a possibilidade de uma utilização diferenciada da matemática por Ohm em relação ao que se praticava em geral pelos estudiosos germânicos da época.

3.1 O artigo de 1843

Foi abordada, anteriormente, a retomada das atividades científicas de Ohm com a publicação de seu primeiro trabalho em acústica no ano de 1839 e a realização de outros dois

trabalhos nos anos de 1840 e 1841. No entanto, parece que Ohm não estava satisfeito com sua dedicação em relação às suas investigações. No dia seguinte a sua nomeação como membro da *Royal Society* (em 6 de maio de 1842), possivelmente aproveitando-se do prestígio que estava obtendo, o estudioso solicitou ao rei seu afastamento das aulas de matemática que haviam sido transferidas para a física, o que foi autorizado em 6 de junho.¹⁹⁴ Isso parece ter dado um novo fôlego para suas pesquisas.

Desta maneira, Ohm conseguiu desenvolver seu segundo trabalho sobre acústica, intitulado “Ueber die Definition des Tones, nebst daran geknüpfter Theorie der Sirene und ähnlicher tonbildender Vorrichtungen” (Sobre a definição de tom juntamente com a teoria associada da sirene e instrumentos semelhantes de produção de tom), o qual, assim como seu artigo de 1839, foi publicado no *Poggendorfs Annalen*¹⁹⁵. Ao contrário do anterior, esse é um extenso trabalho, que se inicia com o desenvolvimento de uma teoria sobre os tons produzidos pela sirene, apresentando aplicações em copiosas situações.

A publicação de 1843 foi o início de uma contenda com Seebeck a respeito da definição dos tons. A disputa teve relação principalmente a como um tom era formado, de que ele era constituído. As componentes de um tom produzido por uma sirene seriam similares às componentes de um tom produzido por uma corda ou um tubo vibrante? Se não, como estas seriam? O que exatamente definiria (formaria) um tom? Os estudiosos envolvidos não explicitaram essas questões, mas elas subjaziam seus trabalhos. Em 1841, Seebeck havia obtido resultados utilizando sua sirene e Ohm, em seu artigo de 1843, explicaria teoricamente estes resultados. Seebeck não aceitaria muito bem estas explicações, expondo suas objeções em um artigo posterior, também publicado no *Poggendorffs Annalen*. Antes de se entrar nestas questões, no entanto, abordar-se-á as ideias principais do que é central nesta pesquisa: o artigo de Ohm de 1843.

¹⁹⁴ Deuerlein, *Georg Simon Ohm*, 16. Conforme foi tratado na Seção 1.3, Ohm vinha sendo reconhecido sucessivamente por diferentes instituições científicas, o que o ajudou a embasar seu pedido de afastamento.

¹⁹⁵ Ohm, “Über die Definition”.

ANNALEN
DER
P H Y S I K
UND
C H E M I E.

ZWEITE REIHE.

HERAUSGEGEBEN ZU BERLIN

VON

J. C. POGGENDORFF.

NEUN UND ZWANZIGSTER BAND.

NEBST VIER KUPFERTAFELN.

LEIPZIG, 1843.

VERLAG VON JOHANN AMBROSIVS BARTH.

Figura 8: Capa da edição do Poggendorfs Annalen em que Ohm publicou seu segundo trabalho sobre acústica.

O artigo inicia-se com um relato de que os estudiosos da época usualmente assumiam uma determinada hipótese como verdadeira: um tom gerado por uma vibração com m oscilações por segundo deveriam conter a forma $a \cdot \sin 2\pi mt$ ou $a \cdot \cos 2\pi mt$, em que t denotaria o tempo e a , a amplitude de oscilação. Ou seja, se fosse possível decompor um tom, ver-se-ia que suas “partes” teriam formato senoidal. E vice-versa, ou seja, a produção dessas impressões (*Eindrücke*) periódicas no ouvido contendo esses formatos senoidais seria necessária para provocar o efeito resultante da sensação de um tom.¹⁹⁶ Esta ideia, no entanto, parecia estar sendo colocada em xeque, uma vez que um pouco mais adiante Ohm fez a seguinte observação:

¹⁹⁶ Nas palavras do estudioso, m denotaria a *Schwingungsmenge* (quantidade de oscilação) do objeto vibratório. O termo *Eindruck* (impressão) é digno de nota, uma vez que foca o efeito causado no órgão auditivo, o que faz com que alguns autores considerem o trabalho de Ohm uma investigação na área da acústica fisiológica. Ver nota 228.

[...] a introdução por Savart e Cagniard Latour de métodos especiais de estímulo de tons parece pretender desalojar os pressupostos provenientes de tempos remotos de sua posição segura, como pelo menos parecem dar a entender as palavras de muitos acústicos bem conhecidos por nós.¹⁹⁷

Ou seja, segundo o estudioso, estes “novos” métodos pareciam diferir dos meios mais utilizados para a produção de som, a saber, os corpos sólidos vibrantes, os quais eram a base da maioria dos instrumentos musicais da época. Conforme visto no capítulo anterior, a roda dentada e a sirene produziam tons por meio de jatos de ar espaçados, ao contrário das formas mais usuais, que os geravam por meio de vibrações contínuas. Ohm fez uma longa citação do trabalho de Roeber para apoiar uma reflexão nesse sentido.¹⁹⁸

No trecho citado, Roeber havia mencionado algo que os experimentos de Cagniard e Savart teriam em comum, a saber, que os tons seriam produzidos pela repetição regular de algum impulso no ouvido.¹⁹⁹ Este trecho pode ter inspirado alguns autores a afirmarem que havia uma crescente evidência da época de que a repetição de um impulso qualquer, não necessariamente de formato senoidal, seria suficiente para a produção de um tom.²⁰⁰ No entanto, mais adiante em seu texto, Roeber também afirmaria que estes impulsos seriam formados por um binômio de condensação e diluição, caso do impulso produzido pela roda dentada no experimento de Savart, ou apenas por uma condensação.²⁰¹ Deste modo, o impulso mencionado por Roeber não teria um formato qualquer, pelo contrário, teria uma forma bem definida. E a ideia de condensação e diluição relaciona-se com o formato do gráfico de uma função senoidal, a qual estaria associada à tradição dos estudos das cordas vibrantes. De qualquer modo, parece que havia um choque entre esta tradição e os estudos sobre os “novos” instrumentos de produção de tons. As posições de Roeber e de Ohm mostram que havia um questionamento pairando no ar sobre se os tons produzidos por estes instrumentos eram similares aos das cordas e tubos ou não. Não parecia haver uma explicação dada em relação ao tema, nem sequer um debate a respeito. Nesse contexto, era um dos objetivos do artigo de Ohm de 1843 verificar se a tradição estabelecida poderia ser mantida ou se seria necessário alterá-la. No entanto, o

¹⁹⁷ Ohm, “Über die Definition”, 513.

¹⁹⁸ Ibid.; Roeber, 30-31; Turner, 4.

¹⁹⁹ Roeber, 30-31.

²⁰⁰ Maley Jr., 110; Kromhout, 481.

²⁰¹ Roeber, 31.

estudioso pareceu adotar uma postura mais conservadora de defesa desta tradição, buscando mostrar que as funções senoidais também dariam conta de explicar os tons produzidos pela sirene.

Conforme abordado, dois anos antes da publicação deste trabalho de Ohm, Seebeck havia realizado vários experimentos utilizando sua sirene e publicado seus resultados no mesmo periódico que Ohm apresentou seus trabalhos em acústica²⁰². Estes resultados foram listados por Ohm em seu trabalho de 1843 de uma maneira sistemática. Após a exposição, o físico acrescentou: “Pelas experiências acima mencionadas de especialistas sobre o verdadeiro elemento do tom, tudo o que foi afirmado anteriormente a esse respeito parece ter sido derrubado, sem que em compensação algo fosse colocado com confiabilidade”²⁰³. Esta frase reforça a interpretação de que Ohm estaria inquieto a respeito da composição/definição de um tom. Ambos os trechos citados parecem indicar que ele estava percebendo a necessidade dos estudiosos da época de uma mudança: uma nova definição de tom, fato que ele mesmo afirmou em seu trabalho em um ponto mais adiante²⁰⁴. Apesar disso, é importante notar que Ohm não parecia propenso a propor mudanças radicais acerca do tema. Pelo contrário, ele mostrou-se cauteloso: não pretendia abandonar as ideias antigas sem antes investigar se estas poderiam ou não trazer uma explicação necessária e suficiente dos novos fatos, ou seja, dos fenômenos observados através da sirene. Por isso, em seu trabalho de 1843, ele tomou como ponto de partida as ideias que considerava antigas.

Uma dessas ideias foi chamada por Ohm de “antiga definição de tom”, a qual ele enuncia de forma sintética em três tópicos. No primeiro, ele afirmou que para a formação de um tom com quantidade de oscilação m , impressões deviam seguir-se umas às outras em intervalos de $1/m$ de comprimento e a forma $a \text{ sen } 2\pi (mt + p)$, em que a denotaria a amplitude, p a fase de oscilação e t o tempo, devia aparecer como completamente pura no intervalo ou ao menos poder ser isolada como uma componente real dessas impressões.²⁰⁵ Ohm não fez referência direta sobre a origem desta ideia, no entanto, sabe-se que ela teria surgido no contexto dos estudos das cordas vibrantes realizados no século XVIII, e acabou sendo aceita para os corpos vibratórios em geral. Por isso, Ohm quis verificar se também faria sentido aceitá-la no caso da sirene. A esse respeito, Maley Jr. afirma que a definição antiga seria a que envolveria a forma

²⁰² Seebeck. “Beobachtungen”.

²⁰³ Ohm, “Über die Definition”, 517.

²⁰⁴ Ibid., 517.

²⁰⁵ Ibid., 513, 518.

$a \sin 2\pi mt$ ou $a \cos 2\pi mt$ e a acima mencionada estaria incluída em uma definição mais estendida proposta por Ohm.²⁰⁶ O historiador parte do que o estudioso mencionou no início de seu artigo, quando referiu-se ao que contemporâneos seus aceitavam (ver pág. 66). No entanto, pode-se dizer que ambas as expressões diziam respeito à definição antiga, pois a única diferença entre $a \sin 2\pi (mt + p)$ e $a \sin 2\pi mt$ é o termo p , que denotaria a fase de oscilação e que não alteraria essencialmente a expressão, uma vez que seu valor poderia inclusive ser nulo. Ohm apenas parece ter formalizado o que ele havia introduzido no início de seu artigo.

Além de Ohm, outros estudiosos também aceitavam as funções senoidais como hipóteses razoáveis relacionadas às vibrações sonoras, como é o caso de Seebeck em seu artigo de 1841, onde ainda combinou duas ondas de período de oscilação iguais, obtendo uma terceira onda também senoidal com o mesmo período das formadoras.²⁰⁷ Roeber fez algo similar, ao afirmar que, após uma conversa com Scheibler, chegou a uma representação de duas ondas produzindo batimentos na situação mais simples possível, ou seja, quando seus máximos e mínimos eram todos iguais e no início a máxima compressão de uma coincidia com o mínimo da outra.²⁰⁸

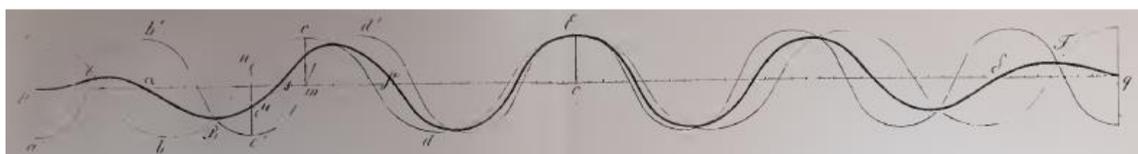


Figura 9: Representação gráfica da produção de batimentos por Roeber²⁰⁹.

Os pontos que formariam a representação da nova onda possivelmente seriam obtidos através da média aritmética das distâncias de cada ponto das duas curvas ao eixo horizontal, considerando-se abaixo dele valores negativos. Pode-se observar que as amplitudes da onda resultante não são constantes, o que, para Roeber, fazia esta onda não produzir a sensação de um tom e sim de batimentos.²¹⁰ Ou seja, não era somente Ohm que estava defendendo as funções senoidais no contexto das vibrações. A utilização delas mostra-se praticamente como

²⁰⁶ Ibid., 518. Maley Jr., 113-14.

²⁰⁷ Seebeck, “Beobachtungen”, 433-34.

²⁰⁸ Roeber, 28.

²⁰⁹ Ibid., anexo (Taf. I).

²¹⁰ Ibid., 30.

um padrão da época. Principalmente ao se levar em consideração que o trabalho de Roerber, como foi discutido anteriormente, era uma compilação de ideias físicas importantes do período.

Ao mesmo tempo em que levou em consideração esta ideia chamada por ele mesmo de “antiga”, Ohm inovou ao utilizar, da maneira que o fez, o “Teorema de Fourier”. De acordo com o próprio texto de Ohm, o teorema afirmava que, se $F(t)$ denotasse uma função qualquer que possuísse valores reais arbitrários no intervalo $[-l, l]$, então entre esses limites poder-se-ia escrever:

$$F(t) = A_0 + A_1 \cos \pi \frac{t}{l} + A_2 \cos \pi \frac{2t}{l} + A_3 \cos \pi \frac{3t}{l} + \dots + B_1 \sin \pi \frac{t}{l} + B_2 \sin \pi \frac{2t}{l} + B_3 \sin \pi \frac{3t}{l} \dots,$$

em que os coeficientes A_i e B_i seriam valores calculados a partir própria função $F(t)$ e do comprimento l relacionado ao intervalo considerado. Em outras palavras, o teorema afirmava que qualquer função $F(t)$ poderia ser escrita como uma soma infinita de cossenos e de senos. Ohm utilizou esse resultado no caso em que $F(t)$ representava um impulso sonoro atingindo o ouvido no instante t com o objetivo de avaliar se este som conteria ou não componentes com uma determinada quantidade de oscilação m .²¹¹ Ao trabalhar desta forma, Ohm implicitamente teria postulado que o ouvido perceberia precisamente as mesmas componentes harmônicas obtidas pela análise de Fourier, o que viria a ser batizado posteriormente de “Lei de Ohm” (da Acústica).²¹²

Pode-se observar, neste ponto, uma permanência de ideias matemáticas, uma vez que Ohm se serviu da teoria de Fourier para desenvolver as suas próprias. Por outro lado, Ohm teria reformulado ideias “antigas” através do trabalho empreendido em 1843. De fato, ele não abandonou completamente as ideias anteriores, ao mesmo tempo em que apresentou uma forma nova de analisar um tom. Os dois principais pontos que ele procurou manter em relação à tradição seriam a “antiga definição de tom”, diretamente associada às funções senoidais (as quais descreveriam os modos de vibração, sendo cada um destes modos responsável pela produção de um harmônico, de acordo com D. Bernoulli) e a ideia da superposição dos modos de vibração. Essas duas ideias teriam sido desenvolvidas em trabalhos de acústica do século

²¹¹ Ohm, “Über die Definition”, 519.

²¹² Ibid., 522; Turner, 5. No entanto, a interpretação de Turner parece ir em uma interpretação mais fisiológica do que física do trabalho de Ohm.

XVIII, ou seja, antes do trabalho de Ohm e até mesmo do de Fourier²¹³. Apesar de todas as controvérsias surgidas, ambos os conceitos (a associação das funções senoidais aos modos de vibração e a superposição de tais modos) permaneceram e foram mantidos pelo trabalho de Ohm.²¹⁴

É compreensível que Ohm não quisesse descartar todos os resultados que foram obtidos no contexto dos estudos das cordas vibrantes, uma vez que esta área tinha se desenvolvido bastante a partir das discussões e das pesquisas de diversos estudiosos. Em relação à associação da função senoidal com as “partes” de um tom produzido pela sirene, Ohm foi mais explícito em seu trabalho, ao enunciar e defender o que entendia por “antiga definição de tom”.²¹⁵ Com a utilização da série senoidal desenvolvida por Fourier, o estudioso empregou uma ferramenta compatível com tal tradição, o que indica sua intenção de mantê-la. A percepção desta intenção contribui para explicar por que Ohm teria utilizado a série. Além disso, como o próprio Ohm menciona, a ferramenta matemática em questão já estava famosa por suas aplicações, o que pode ter chamado a atenção do estudioso para utilizá-la em seu trabalho publicado em 1843.

Outro ponto bastante importante sobre esta questão da manutenção das funções senoidais por Ohm é o fato de o estudioso tomar, como representante de um impulso da sirene, a função $F(t) = \alpha \sin 2\pi \frac{t}{4\lambda}$, sendo a duração deste impulso do instante $t = 0$ ao instante $t = 2\lambda$ (ficando subentendido que α denotaria a amplitude do impulso). Essa expressão, bem como a forma associada a ela, é bem específica, uma vez que, ao utilizá-la, ele estava restringindo os impulsos da sirene ao formato senoidal. Turner, em seu trabalho de cunho histórico, considerou que a escolha de Ohm teria sido arbitrária.²¹⁶ No entanto, essa escolha muito provavelmente está vinculada aos estudos anteriores das cordas vibrantes, conforme mencionado. Desta forma, ainda que Ohm tenha assumido uma hipótese relativamente restritiva, esta não seria arbitrária; ele estava, segundo o próprio, baseando-se em uma tradição, a qual pretendia manter.

²¹³ Darrigol.

²¹⁴ Esse embasamento na tradição também é reconhecido por Ullmann, que afirmou que além das investigações realizadas com os instrumentos de cordas, aquelas realizadas com os instrumentos de sopro também teriam servido de referência para Ohm. Cf. Ullmann, *Chladni und die Entwicklung*, 175.

²¹⁵ Embora realmente pareça haver uma tradição nesse sentido, também existiram estudiosos que se opuseram às funções senoidais como representantes das vibrações elementares.

²¹⁶ Turner, 5.

Reforça esta interpretação a semelhança das ideias de Ohm e D. Bernoulli em seus trabalhos.²¹⁷ De fato, há o ponto em comum de que ambos usaram séries senoidais para explicarem fenômenos sonoros. No entanto, a principal diferença é que enquanto D. Bernoulli foi extremamente cuidadoso em criar uma explicação visual e física do movimento da corda vibrante, Ohm confiou no poder da matemática para apontar a existência e a compatibilidade das funções senoidais com os resultados obtidos utilizando-se a sirene. Esta ideia da utilização da matemática no trabalho de Ohm será retomada mais adiante nesta tese para ser tratada com mais detalhes.

Assim como a “antiga definição de tom”, a ideia de que os modos de vibração de uma corda coexistiriam de maneira superposta também foi mantida por Ohm com a utilização da série, embora de maneira implícita, ao contrário da primeira. A teoria da superposição dos modos de vibração, proposta por D. Bernoulli no século XVIII, foi elaborada para explicar os pequenos tons que acompanhavam o tom principal emitido por uma corda vibrante (denominados harmônicos) e foi estendida para outras formas de produção de som pelo próprio estudioso. Após muitas controvérsias, ela conseguiu sobreviver à virada de século, chegando até Ohm por meio do acesso aos trabalhos de estudiosos franceses, os quais alimentaram de ideias suas investigações.²¹⁸ E Ohm foi o responsável por estender o conceito da superposição para os tons produzidos pela sirene, contribuindo para que chegasse a von Helmholtz, que acabou consolidando-a por meio de suas pesquisas e da defesa das ideias de Ohm. Ao contrário da associação das funções senoidais às “partes” de um tom produzido pela sirene, o pressuposto da superposição ficou implícito.

Assumindo ambas as hipóteses como válidas (das funções senoidais e da superposição), Ohm estaria tratando o tom produzido pela sirene da mesma forma que o produzido pelas cordas, a menos que surgisse algo muito discrepante. Caso ocorressem, tais diferenças indicariam que ambos não teriam constituições semelhantes. No entanto, as discrepâncias apontadas por Seebeck não foram suficientes para tirá-lo do caminho pretendido.

Todas essas observações em relação ao artigo de 1843 ajudam a mostrar que as ideias de Ohm em relação a um tom não surgiram de forma súbita e desconexa de tudo o que já existia e que estava sendo discutido no momento. No entanto, apesar das permanências de ideias

²¹⁷ Maley Jr. afirma que essa semelhança ocorre, ao menos de maneira semântica, em suas próprias palavras. Cf. Maley Jr., 117.

²¹⁸ Turner observa a aceitação da “superposição não perturbada” como uma aproximação válida para todos os tipos de corpos vibrantes no fim do século XVIII. Cf. Turner, 3.

mencionadas, Ohm produziu uma ruptura quando fez um uso novo de uma ferramenta matemática, transpondo o contexto de estudos sobre o calor em direção aos estudos sobre o som com o objetivo de alcançar respostas para questões que o inquietavam. A ressignificação de ideias antigas e a nova utilização de uma ferramenta matemática foram grandes contribuições de Ohm para os estudos do som.

A respeito do artigo de 1843, há quem tenha afirmado que Ohm teria utilizado sua definição de tom para explicar os experimentos de Seebeck.²¹⁹ Importante ressaltar, no entanto, que a definição de tom de Ohm, é, ao que tudo indica, a reformulação da chamada “antiga definição” em um novo contexto. Ou seja, a nova definição consideraria um tom produzido por uma sirene da mesma forma que aquele produzido por uma corda vibrante, uma vez que em ambos os casos os tons que acompanhariam o principal, inclusive este, teriam um formato senoidal. Deste modo, sua definição seria nova, mas ao mesmo tempo antiga.

Conforme mencionado, Ohm listou de maneira sucinta os resultados obtidos por Seebeck e buscou explicá-los. Para exemplificar, considere-se os dois primeiros resultados explicitados pelo próprio Ohm:

a) Prepare-se contra uma sequência de furos da sirene dois tubos dos dois lados opostos perpendicularmente ao disco, de tal forma que, se um estiver à frente de um furo, o outro também estaria oposto a um furo. Sobre-se com um destes tubos contra o disco em rotação, então eles dão, cada um, o mesmo tom; porém sobre-se com os dois ao mesmo tempo, então o tom some e ouve-se somente, ou quase somente, o sibilo que a passagem do ar causa.

b) Se se colocam duas sequências de buracos, das quais uma tem o dobro de furos do que a outra, então ela dá a oitava do tom da última, e normalmente ouve-se, se os dois são soprados ao mesmo tempo, também os dois tons ao mesmo tempo. Somente se o sopro é feito dos dois lados opostos, e de tal forma que cada batida de ar do tom mais grave encontra-se exatamente com uma [batida] da mais aguda, desaparece o tom agudo e ouve-se o grave sozinho.²²⁰

Partindo da utilização da série que Fourier desenvolveu e, realizando cálculos, Ohm chegou a várias conclusões, as quais utilizou para justificar os resultados de Seebeck. Veja a seguir como isso se aplica aos dois exemplos citados acima:

²¹⁹ Vogel, 264.

²²⁰ Ohm, “Über die Definition“, 515.

5.α) As impressões que se repetem em intervalos de comprimento $2l$ produzem um tom da quantidade de oscilação $\frac{1}{2l}$, se as impressões que se encontram nos intervalos sucessivos mantêm uma e a mesma posição em cada intervalo e permanecem sempre do mesmo tipo pelo menos enquanto o nosso órgão de audição exigir ondas tonais sucessivas para detectar o tom.

5.β) As impressões que se repetem em intervalos de comprimento $2l$ não produzem um tom da quantidade de oscilação $\frac{1}{2l}$, se a posição das impressões ou a sua natureza sofrer uma mudança de intervalo para intervalo.²²¹

6.I.β) Se em cada um dos sucessivos intervalos de tempo de $2l$ houver duas impressões da mesma forma, tamanho e posição, mas de tipos opostos, é produzido um tom da quantidade de oscilação $\frac{1}{2l}$, que é mais forte quando a distância das duas impressões uma da outra é igual a metade do intervalo, que se torna mais fraca à medida que esta distância aumenta ou diminui, e que finalmente desaparece completamente quando esta distância se torna zero ou igual a $2l$.²²²

11.a) É permitido sob todas as circunstâncias acrescentar às impressões já existentes de um intervalo duas novas impressões iguais e opostas, se apenas um e o mesmo lugar for atribuído a ambas; e da mesma forma, onde em circunstâncias especiais duas impressões iguais e opostas referentes ao mesmo local se revelam, podem ser omitidas da consideração sem prejuízo de todos os resultados.²²³

As conclusões 5.α) e 5.β) dizem respeito às condições de existência de um tom. De acordo com elas, para que um tom existisse, seria necessário e suficiente que as impressões sempre estivessem na mesma posição no intervalo e fossem do mesmo tipo. Já o item 11.a) afirma que as impressões iguais e opostas acabavam se cancelando, uma vez que se poderia colocar um par de tais impressões no mesmo local (ou retirar) sem alteração em relação ao(s) tom(s) produzido(s), o que justificaria o resultado a) de Seebeck. O resultado b) foi justificado por meio da combinação das conclusões 6.I.β) e 11.a). De acordo com a primeira, os dois tons apareceriam, caso a distância entre as impressões contrárias fosse igual à metade do intervalo. Se a distância fosse nula ou igual a $2l$, ocorreria o cancelamento de metade das impressões, de acordo com a segunda, restando somente o tom mais grave.

O terceiro resultado obtido por Seebeck utilizando a sirene que Ohm elencou é o seguinte:

²²¹ Ibid., 525.

²²² Ibid., 529.

²²³ Ibid., 550.

c) Se uma sequência de rápidos impulsos sucessivos não isocronicos chegam ao ouvido, mas de maneira que o intervalo de tempo entre dois se alterne entre t e t' , então o tom se comporta como se o intervalo fosse $t+t'$, e se t e t' não forem muito diferentes um do outro, ouve-se ainda, ao mesmo tempo, um tom de duração de oscilação $\frac{(t+t')}{2}$, ou seja, uma oitava acima do primeiro. Com isso, Seebeck fez a observação, que o tom mais agudo ou o mais grave é mais acentuado conforme os valores t e t' estiverem mais ou menos próximos.²²⁴

Também partindo da série e realizando cálculos, Ohm concluiu que:

6.I.α) Se houver duas impressões do mesmo tipo, forma, tamanho e posição em cada um dos intervalos sucessivos de comprimento $2l$, um tom será produzido a partir da quantidade de vibração $\frac{1}{2l}$, mais forte quando ambas as impressões ocorrem simultaneamente ou distam em $2l$, mais fraco quanto mais a distância entre as duas impressões por um lado se distancia de zero e, por outro lado, de $2l$, e que finalmente desaparece completamente quando essa distância se torna metade da duração do intervalo.

6.II.α) Se houver duas impressões do mesmo tipo, forma, tamanho e posição em cada um dos intervalos sucessivos de duração de $2l$, um tom será produzido a partir da quantidade de vibração $\frac{2}{2l}$, mais forte quando a distância entre as duas impressões de um ao outro é zero ou igual a l , ou também igual a $2l$, mais fraco quanto mais essa distância se afasta de um dos três valores dados, e que finalmente desaparece completamente quando essa distância se torna $\frac{l}{2}$, ou $\frac{3l}{2}$.²²⁵

Observe-se que em 6.II.α, tem-se a quantidade de oscilação $\frac{2}{2l}$, o dobro da que se observa em 6.I.α $\left(\frac{1}{2l}\right)$, o que faz o segundo caso representar uma oitava acima do primeiro. Este é o caso do resultado obtido por Seebeck. É importante também observar que a oitava de baixo possuiria sua intensidade máxima se a distância entre as duas impressões fosse zero ou $2l$ e sua intensidade mínima quando a distância fosse l . Esta última seria precisamente a distância em que a oitava de cima teria sua intensidade máxima. Por outro lado, em $\frac{l}{2}$ e $\frac{3l}{2}$ a oitava de baixo seria mais forte (apesar de não estar em sua intensidade máxima) e a oitava de cima teria sua intensidade mínima. Ohm deixou claro que estas conclusões explicariam o resultado obtido por Seebeck, mas não a causa do aparecimento dos tons.

²²⁴ Ibid., 516.

²²⁵ Ibid., 529-530.

Uma linha similar foi seguida durante toda a extensão do longo trabalho. Boa parte de seus resultados foram obtidos através de cálculos para explicar os fenômenos observados por Seebeck, empreendimento no qual acredita ter tido sucesso. Deste modo, Ohm acabou concluindo que a antiga definição serviria para os tons produzidos pela sirene, o que teria respondido à pergunta colocada no início do trabalho.

A grande novidade no trabalho de Ohm foi a utilização da série de senos e cossenos de Fourier na análise de sons ainda não muito explorados à época: os tons produzidos pela sirene (no caso, a de Seebeck). O que se sabia é que eram ouvidos, além do tom principal produzido pelas formas mais usuais de produção, outros tons acompanhantes, chamados pelos estudiosos de harmônicos. Com a série, Ohm conseguiu analisar um tom considerado (por ele mesmo) como complexo, de tal forma que os coeficientes da série indicariam a presença (ou não) de cada um destes pequenos tons, vistos como componentes, além de mostrar suas intensidades, embora Seebeck tivesse contestado o fato de algumas delas não coincidirem com a experiência.

Mas para realizar tal análise, Ohm precisaria saber se os tons produzidos pela sirene de Seebeck tinham componentes que obedeciam a leis senoidais, o que ele justamente realizou usando a série de senos e cossenos. Na prática, ele assumiu que as componentes seriam senoidais e, caso não fossem na realidade, encontraria alguma contradição em seus cálculos. Embora Seebeck tivesse apontado algumas, essas contradições não foram suficientes para dissuadir Ohm da ideia que o tom produzido pela sirene era similar ao da corda vibrante, por exemplo.

Alguns historiadores observam que a utilização feita por Ohm da série seria equivalente a postular que o órgão de audição se comporta como um analisador de Fourier²²⁶. Essa ideia traz consigo uma imprecisão, pois acaba dando a entender um sentido contrário do que teria de fato ocorrido. A partir do trabalho de Ohm e do contexto em que estava inserido, pode-se perceber um caminho inverso, ou seja, que o estudioso teria compreendido que o analisador de Fourier (a série) descreveria bem a percepção do órgão auditivo. Nesse sentido, Ohm teria realizado uma pesquisa físico-matemática e não fisiológica, apesar de ter impactado esta segunda área. Possivelmente, essa tendência de se enxergar o outro sentido se dê por conta dos trabalhos posteriores de von Helmholtz, que trabalhou com a acústica fisiológica, inclusive justificando e batizando o resultado de Ohm. Nessa questão, Lindsay parece ser um pouco mais

²²⁶ Carazza, Helmholtz, “La legge di Ohm”, 208; Boring, “Sensation and perception”, 321-22; Maley Jr., 116; Turner, 5.

cuidadoso, embora ainda escreva de modo como se a ênfase da teoria de Ohm fosse em revelar a capacidade do ouvido humano de analisar um tom complexo. Ullmann, por outro lado, afirmou que a significância do trabalho de Ohm estaria no fato de o ouvido fazer uma síntese mesmo em tons que não fossem assumidos como constituídos por oscilações pendulares (representadas por funções senoidais).²²⁷ Novamente, a interpretação sugere que Ohm teria percebido uma capacidade do ouvido, embora nesta situação não como instrumento de análise, mas de síntese dos sons, o que não parece ser uma forma muito precisa de se olhar a questão. Já Turner afirmou que o trabalho de Ohm implicaria que o ouvido seria capaz de realizar uma decomposição em uma série harmônica de componentes pendulares (senoidais) mesmo quando não fosse possível mostrar que uma onda complexa seria constituída por vibrações pendulares.²²⁸ Ou seja, o ouvido seria capaz de fazer uma análise dos tons mesmo nesses casos. Análise ou síntese? Ou ambos? Aparentemente esta divergência ocorre pelo fato de se tentar compreender não o trabalho em si, mas sim suas implicações.

Em uma das biografias de Ohm, é possível destacar algumas considerações sobre a chamada lei encontrada pelo estudioso. Conforme escreveu o biógrafo, de acordo com tal lei um determinado corpo sonoro produziria outros tons mais altos do que o fundamental ouvido simultaneamente a este. Estes tons seriam produzidos por meio de oscilações cujas quantidades eram múltiplas da quantidade de oscilação do tom fundamental. Portanto, o resultado costumeiro de se ouvir seria uma composição de tons formados por tais movimentos.²²⁹ No entanto, é preciso deixar claro o que foi contribuição de Ohm e o que foi de outros estudiosos. Pelo fato de o trabalho ser mais propriamente biográfico, há uma tendência em se buscar valorizar o trabalho do biografado, o que pode fazer com que se misturem as contribuições. Isso sem contar a época em que foi escrita, na qual os autores utilizavam outros critérios que não os

²²⁷ Lindsay, 639. Ullmann, *Chladni und die Entwicklung*, 176.

²²⁸ Turner, 7. Turner também afirma que a contribuição de Ohm não seria sobre corpos vibrantes ou sonoros ou sobre a matemática das ondas, mas sim sobre a fisiologia da percepção acústica e que ele mesmo não havia percebido isso. Uma consideração a ser feita é que usar o termo acústica fisiológica para classificar os trabalhos de Ohm sobre o som pode dar a entender que ele teria efetivamente investigado com algum nível de profundidade a recepção sonora pelo ouvido humano, o que não é o caso. Apesar de as áreas física e fisiológica não estarem desassociadas, uma vez que era necessária a utilização da audição como referência para os estudos físicos, sua preocupação era claramente em relação à física do som. Ainda sobre essa questão, Turner observa que a disputa Ohm-Seebeck teve vínculo com dimensões fisiológicas, psicológicas e filosóficas da percepção sensorial. Por exemplo, Ohm refere-se a uma “ilusão auditiva” de efeito “involuntário” para defender sua teoria ante Seebeck, embora ele não busque explicar sua causa. Seebeck, em outro momento, faz algumas considerações sobre a capacidade de um ouvido analisar um sistema de impulsos e de receber uma impressão de uma altura tonal definida de um isocronismo aproximado tanto quanto de um isocronismo perfeito. Ambos, portanto, tocam em questões fisiológicas, embora não tenham se dedicado a fundo a elas. Cf. Turner, 4, sobre Seebeck e 10, sobre Ohm; Ohm, “Noch ein Paar”, 15.

²²⁹ Von Bauernfeind, 196.

de hoje em dia. A ideia de serem ouvidos outros tons mais agudos simultaneamente com esta relação de multiplicidade das quantidades de vibração já estava presente no trabalho de D. Bernoulli sobre as cordas vibrantes mencionado anteriormente. Ohm, porém, estaria estendendo-a para o caso da sirene, dando um passo rumo a uma generalização, embora alguns autores afirmem que o resultado de Ohm já teria um caráter geral.²³⁰ Nesse sentido, ele estava indo em busca de uma lei geral da natureza assim como muitos outros estudiosos de sua época, embora ele não tenha se manifestado explicitamente sobre a questão no caso específico do som, ao menos até onde se sabe. Sua teoria seria assim reconhecida posteriormente por von Helmholtz que, além de batizá-la iria justificá-la.²³¹

Em outra biografia de Ohm, consta a afirmação de que o trabalho em questão dizia respeito à formação de sons de mesma altura, porém com diferentes timbres. Consta também que, de acordo com o artigo de Ohm, o tom fundamental determinaria a altura do tom complexo enquanto seus *Obertöne* definiriam o timbre²³². A respeito destas afirmações, é importante alertar que é necessário ter um pouco de cuidado, pois apesar da influência dos trabalhos de Ohm sobre os de von Helmholtz em um momento posterior, a investigação de Ohm não lidou diretamente com a questão do timbre. Seu intuito era somente analisar a composição/definição de um tom produzido pela sirene de Seebeck, teoria que viria a ser posteriormente utilizada para explicar o conceito de timbre através da combinação dos harmônicos. Ver uma explicação sobre timbres nos trabalhos de Ohm é antecipar resultados que apareceriam posteriormente. Seebeck chega a tocar nesse tema em seu artigo de 1843, quando está buscando refutar um dos argumentos de Ohm no âmbito da disputa sobre a definição de tom.²³³ No entanto, esse não era o cerne de sua pesquisa e, portanto, não desenvolveu mais suas ideias a respeito, o que acabou sendo realizado posteriormente por von Helmholtz.

²³⁰ Lindsay, por exemplo, afirma que a teoria de Ohm estipulava que todos os tons musicais eram formados por vibrações simples harmônicas de frequência definida. Cf. Lindsay, 639; já Lloyd afirma que de acordo com a teoria, as únicas vibrações percebidas pelo ouvido como tons puros eram as pendulares. Cf. Lloyd, “Electronic Organs and the Phonodeik”, 682.

²³¹ Von Helmholtz, 52-56.

²³² O termo *Obertöne* pode ser traduzido para o inglês como *overtones* ou *harmonics* e para o português, como harmônicos. Ohm, porém, não o utiliza em seu trabalho de 1843. Seebeck utiliza o termo em seu artigo publicado como resposta ao de Ohm, também em 1843; von Füchtbauer, 227. Uma ideia similar aparece em Lindsay, 639 e em Lloyd, 682. Essa ideia é contradita por Maley Jr., que afirma que não havia entendimento do fato que diferentes timbres implicariam diferentes números e/ou intensidades dos tons superiores. Cf. Maley Jr., 106.

²³³ Seebeck, „Ueber die definition“, 474. Seebeck não utiliza explicitamente a palavra timbre, mas diz que em duas situações diferentes consideradas por ele os sons teriam uma diferença na sonoridade, o que é basicamente a ideia de timbre.

Ullmann também tratou da situação do tema timbre na época. O pesquisador apontou que a questão de como se explicar pelos métodos científicos da época o que definia um timbre ainda estava em aberto na primeira metade do século XIX²³⁴. Ullmann reforçou sua afirmação através da citação de uma fala do estudioso germânico Ernst Florenz Friedrich Chladni (1756-1827) em um de seus últimos trabalhos, publicado em 1827: “Das diferenças qualitativas do som (em francês *timbre*, para a qual em alemão poderia ser necessária a palavra *Laut*) o essencial ainda é desconhecido.”²³⁵ O próprio Chladni chegou a apresentar uma explicação sobre o timbre, bem no final de sua vida, a qual dizia respeito à maneira com que um impulso agia sobre uma pequena parte da corda²³⁶. Contudo, a explicação do estudioso não tinha relação com teorias mais recentes sobre o timbre baseadas nos harmônicos superiores de um som. Nesse sentido, tal tentativa de explanação não teria saído como “vitoriosa”, ou que permaneceu. É provavelmente por esse motivo que Ullmann considerou a questão do timbre como não resolvida mesmo com a existência de uma explicação dada por Chladni.

Sobre o assunto relativo à explicação de timbre não estar resolvido à época é uma reflexão que se pode e se deve fazer. O que significaria a questão estar resolvida? Para Ullmann talvez isso queira dizer que houvesse uma teoria consensual entre os cientistas mais influentes. De fato, ao que tudo indica, a explicação de Chladni não parecia ser consensual nesse sentido. Além do mais, não era uma teoria baseada em experimentação e na utilização de ferramentas matemáticas conforme pediria o modelo da ciência moderna cada vez mais presente. E mais: a explicação de Chladni não foi a que permaneceu, como é possível ver a partir do exame dos trabalhos realizados à época de Ohm.

De acordo com Turner, os trabalhos de Ohm na área de acústica fisiológica teriam tido pouco impacto imediato na ciência da sua época, exceto para Seebeck, que estava diretamente implicado na questão.²³⁷ Pode-se observar um consenso entre os relatos sobre a questão do reconhecimento tardio dos trabalhos em acústica de Ohm, uma vez que outros autores também afirmaram que ele ocorreu posteriormente, de modo similar às suas pesquisas na área do galvanismo.²³⁸ Este reconhecimento teria acontecido após os trabalhos de Hermann Ludwig von Helmholtz (1821-1894), o responsável por batizar de “Lei de Ohm” a propriedade da decomposição e análise das componentes de um tom por meio da série de Fourier. Além disso,

²³⁴ Ullmann, *Chladni und die Entwicklung*, 173.

²³⁵ Chladni, *Kurze Uebersicht der Schall- und Klanglehre*, 5-6 apud Ullmann, *Chladni und die Entwicklung*, 66.

²³⁶ A explicação é tratada por Ullmann. Cf. Ullmann, *Chladni und die Entwicklung*, 173.

²³⁷ Turner, 6.

²³⁸ Von Füchtbauer, 228-230; von Bauernfeind, 197; Gerlach, “Georg Simon Ohm”, 102.

o número de pesquisadores que havia estudado minuciosamente o trabalho de von Helmholtz e por isso reconhecia o valor do trabalho de Ohm era pequeno em relação ao número daqueles que ou não mencionavam as contribuições do estudioso ou a creditavam a von Helmholtz, apesar deste repetidamente deixar claro que determinadas contribuições foram realizadas por Ohm e não por ele.²³⁹ A essa altura, Ohm já tinha tido o reconhecimento de seus trabalhos sobre a corrente galvânica por instituições prestigiosas e, portanto, não era um desconhecido das comunidades de estudiosos, mesmo assim seu artigo de 1843 não teve repercussão imediata. Para Turner, dois pontos podem ter contribuído para tal: o seu “estilo de apresentação” e a expectativa dos outros estudiosos de que o trabalho não contivesse nada de novo. Para justificar esta afirmação, Turner se apoiou no fato de que os estudiosos sabiam de longa data que cordas e tubos produziam tons compostos de vibrações pendulares (senoidais) e que Ohm teria meramente estendido essa ideia para o caso da sirene e formalizado a questão. O próprio Ohm teria considerado sua contribuição desta maneira.²⁴⁰ Estas afirmações parecem bastante plausíveis, principalmente no que diz respeito à forma de Ohm expor e buscar seus resultados, questão que será discutida mais adiante.

Chama a atenção, em um primeiro momento, o fato de Ohm utilizar uma ferramenta matemática proveniente dos estudos sobre calor em sua pesquisa acústica. No entanto, uma série de fatores explica este “empréstimo matemático”. O fato de Fourier ter conhecimento de boa parte da discussão sobre as cordas vibrantes do século XVIII é um ponto que deve ser levado em consideração para compreender o ocorrido. Possivelmente pelo fato de as equações e os métodos utilizados nos estudos sobre o som e o calor se mostrarem similares em algumas situações, Fourier via ambos como semelhantes, o que se pode ver nos trechos mencionados no capítulo anterior. Como Ohm se inspirou em Fourier, acabaria carregando consigo em seus trabalhos a aproximação entre som e calor. Deste modo, Ohm teria apenas feito com que a soma de senos e cossenos retornasse ao seu lugar de origem.

A partir do material analisado, não é possível concluir de modo contundente que Ohm também via o calor e o som como semelhantes. No entanto, a postura do estudioso frente a algumas situações propicia reflexões em relação a questão de aproximar fenômenos e áreas, em direção a uma unidade de pensamento, ideia presente tanto na corrente da *Naturphilosophie* quanto nos ideais de W. von Humboldt, discutidas, ainda que de forma breve, anteriormente.

²³⁹ Von Bauernfeind, 197.

²⁴⁰ Turner, 7.

Por exemplo, na introdução de seu famigerado livro de 1827 sobre a corrente galvânica, Ohm falou sobre o intuito de seu trabalho:

O esforço deste tratado é o de derivar numa conexão próxima, de alguns poucos princípios, em grande parte dados pela experiência, a essência dos fenômenos galvânicos, os quais são produzidos pelo contato de dois ou mais corpos debaixo um do outro e são compreendidos sob o nome de galvânico; a sua intenção é alcançada quando desta forma a diversidade de fatos é colocada sob a unidade de pensamento.²⁴¹

O trecho revela algo que não é específico deste trabalho, mas de sua postura frente aos fenômenos naturais. Não é algo acidental, mas intrínseco a sua forma de se fazer ciência. Revela suas intenções e objetivos ao se estudar os fenômenos. Embora neste trabalho sobre o galvanismo Ohm não tenha aproximado os fenômenos da mesma maneira que o fez em seu trabalho sobre a definição de tom, em ambos os casos o estudioso acabou caminhando em direção a uma “unidade de pensamento”.

É possível observar esta direção mais de uma vez em seu livro sobre o galvanismo. O trabalho, teria sido elaborado utilizando termos e argumentos similares aos dos trabalhos sobre o calor de Fourier.²⁴² Ainda na introdução do livro mencionado, Ohm afirmou que:

A forma e o tratamento das equações diferenciais obtidas desta forma são tão semelhantes às que nos foram dadas para o movimento do calor por Fourier e Poisson que, por si só, se não houvesse outras razões, a conclusão poderia ser tirada com toda a justificação quanto a uma ligação interna entre os dois fenômenos naturais, e esta relação de identidade aumenta quanto mais se a persegue.²⁴³

Deste modo, Ohm acabou considerando os fenômenos como conectados e a matemática teria tido um papel importante para que chegasse a essa conclusão, uma vez que as equações diferenciais estariam mostrando isso. Mas, como Ohm usou argumentos similares aos de Fourier, inevitavelmente chegaria a equações e conclusões semelhantes às do estudioso francês.

²⁴¹ Ohm, *Die galvanische Kette*, 1.

²⁴² Garber, 156-57; Jungnickel, 53-54.

²⁴³ Ohm, *Die galvanische Kette*, 5.

Em relação à definição de tom, Ohm novamente aproxima áreas, ao implicitamente considerar a propagação do tom produzido pela sirene como similar ao calor propagado em um sólido. Mas similar em que sentido? A esse respeito, Michael Heidelberger afirma que ao aceitar Fourier, Ohm teria abandonado a ontologia. A citação que Heidelberger faz de Fourier ajuda a entender o que isso significaria:

A verdade destas equações não é fundada em qualquer explicação física dos efeitos do calor. De qualquer maneira que nos contentemos a imaginar a natureza deste elemento, se a consideramos como uma coisa material distinta que passa de uma parte do espaço a outra, ou se fazemos o calor consistir simplesmente na transferência de movimento, nós sempre chegaremos às mesmas equações, uma vez que a hipótese que formamos deve representar os fatos gerais e simples dos quais as leis matemáticas são derivadas.²⁴⁴

Ou seja, Fourier não parecia estar interessado no que era o calor materialmente falando, mas em suas propriedades. Para ele, qualquer que fosse a explicação material para o calor, este continuaria comportando-se da mesma maneira. E descobrir e representar como ele se comportaria seria o mais importante em um trabalho sobre os fenômenos físicos.

Ohm tem uma postura similar quando usa a série senoidal para examinar os resultados obtidos por Seebeck com a sirene. Não se sabia se o tom produzido pela sirene tinha ou não a mesma natureza do que o das cordas ou dos tubos vibrantes. Contudo, para Ohm, para que tivesse, bastaria que apresentasse as mesmas propriedades, ou seja, obedecesse à “antiga definição de tom” e (implicitamente) à teoria da superposição dos modos de vibração. Ao fim de seu trabalho, ele entendeu que isso de fato ocorria. Deste modo, ele teria revelado a essência do tom produzido pela sirene.

No capítulo anterior, onde se aborda as fontes do trabalho de Ohm, foi mencionado que os trabalhos de Fourier estavam condizentes com a ideia de Comte de que a ciência não deveria investigar as causas íntimas dos fenômenos, mas sim buscar suas leis (que deveriam ser simples e gerais). Ohm parecia estar caminhando em uma direção similar nos seus estudos sobre o galvanismo e, o que é importante para essa pesquisa, nos estudos sobre o som.

²⁴⁴ Fourier, “The analytical theory of heat”, 432 apud Heidelberger, “Some patterns of change”, 7.

A direção escolhida por Ohm em suas pesquisas foi um dos choques com a *Naturphilosophie*, representada pelo professor Pohl que acreditava ser mais adequado prestar atenção à essência das coisas, o que não seria simplesmente revelar leis. Embora a forma de Pohl fazer ciência já não fosse mais tão representativa à época, pertencia a uma das correntes existentes, da qual o ministro responsável pela educação da época também era adepto.

Outro ponto de conflito com a corrente de pensamento foi o fato de Ohm ter enfatizado a realização de experimentos, distanciando-o dos adeptos da *Naturphilosophie*. No entanto, mesmo considerando as divergências, é possível observar uma similaridade entre essa corrente e a forma de Ohm fazer ciência. Essa busca por aproximações, tais como a analogia entre o fluxo de calor e o da corrente galvânica e a utilização da definição dos tons produzidos pelos objetos vibrantes naqueles produzidos pela sirene também vai na direção de uma unidade, a qual remete à *Naturphilosophie*. Para esta corrente de pensamento, matéria e mente/espírito eram aspectos de uma mesma realidade básica. Nesse sentido, o universo seria um “cosmos” unitário e ordenado.²⁴⁵

O “abandono da ontologia”, ou a falta de atenção à essência das coisas (em um sentido mais concreto), estaria relacionado a uma busca por leis gerais e simples. Essa parece ser uma questão bastante importante que permitiu a transposição da série senoidal do contexto de estudos sobre calor para o de estudos sobre o som, feita por Ohm, acompanhando, de certa forma, Fourier, para quem havia similaridades entre o som e o calor, embora estas semelhanças tenham sido observadas em relação às propriedades de ambos e não à sua matéria. Ohm, até onde se sabe, não se manifestou sobre a questão, mas pela utilização da série pareceu seguir uma direção similar à de Fourier.

Embora a utilização da série senoidal tenha como ponto de partida dúvidas de Ohm sobre a essência de um tom qualquer, a forma de buscá-la seria diferente do que aparentemente esperavam alguns estudiosos. Pelo fato de Ohm não ter como verificar visual ou auditivamente se a função senoidal também representava os pulsos emitidos pela sirene, o estudioso viu-se em uma completa escuridão. O que não se poderia verificar por meio dos sentidos, seria possível com a utilização, segundo suas palavras, da “tocha da matemática” para explorar a área.²⁴⁶ Uma

²⁴⁵ Waisse-Priven, 70.

²⁴⁶ Jungnickel, 55; Hartmann, 71. Essa expressão é utilizada por Ohm em uma carta endereçada ao ministério responsável pela administração das aulas, em 1826, solicitando um ano para se dedicar a seus problemas científicos. A expressão também parece apropriada para o caso dos estudos acústicos, uma vez que dá uma pista de como o estudioso enxergaria a ciência de um modo geral.

vez que os olhos e os ouvidos não poderiam dizer se a sirene produzia tons com componentes senoidais, a série utilizada por Fourier poderia.²⁴⁷

Juntamente com a utilização da “tocha da matemática”, Ohm lançou mão de analogias, o que pode ser observado em seus trabalhos sobre a eletricidade, de acordo com a historiografia e em seus trabalhos sobre o som. No segundo caso, o qual diz respeito à presente pesquisa, as analogias seriam: indiretamente a relação calor/som feita por Fourier, que Ohm acabou passando adiante, e diretamente a relação da tradição dos estudos das cordas vibrantes com os estudos utilizando a sirene.²⁴⁸

Essas analogias remetem à fala do estudioso C. Pfaff, que teria afirmado que para a compreensão das substâncias imponderáveis, o físico teria que compará-las às ações de substâncias diretamente observáveis.²⁴⁹ W. Weber e E. Weber, os irmãos Weber, foram ainda mais específicos em relação a uma teoria unificadora, buscando descrever ondas em cordas, na água, no ar e no éter, como um fenômeno universal.²⁵⁰ Ohm acabou indo na direção indicada por tais estudiosos. Como não era possível enxergar o tom produzido pela sirene e nem o ouvir de modo a identificar sua definição, Ohm o comparou (mais precisamente o equiparou) ao produzido pelos corpos vibrantes já bem mais estudados. De acordo com sua investigação, os pulsos emitidos pela primeira obedeceriam às mesmas leis das vibrações produzidas pelos últimos. Além disso, a analogia implícita do calor/som que a aplicação da série carrega também vai no sentido de uma unidade. Pode-se dizer também que, seguindo esse caminho, o estudioso estaria tentando encontrar leis simples e gerais da natureza. E nessa busca, ferramentas matemáticas teriam um papel importante.

A utilização de tais ferramentas por Ohm poderia ser considerada uma forma de compensar sua dificuldade auditiva. De acordo com dados biográficos, uma vez que o estudioso não possuía um bom ouvido, ele teria precisado contar com o auxílio de seu colega e amigo Dr. Kellermann para a realizar a pesquisa, tendo o auxiliado no teste da lei acústica. Além desta

²⁴⁷ Esse ponto vai de encontro com o que afirma o pesquisador Kromhout ao referir-se ao poder que Ohm enxergava na matemática de acessar a áreas além da percepção sensorial, bem como de descobrir as “leis simples” da natureza sem a necessidade de realizar experimentos próprios. No entanto, Ohm não desprezava a parte empírica da investigação e esta pode ser enxergada como os próprios experimentos de Seebeck. Cf. Kromhout, 487.

²⁴⁸ John McKnight também reconhece a utilização de analogias por Ohm. Cf. McKnight, *Laboratory Notebooks*, 114. Jungnickel também afirma que Ohm teria realizado analogias entre a corrente galvânica e o fluxo resistido de fluidos e a corrente galvânica e a teoria do calor de Fourier. Neste segundo caso, as equações teriam mostrado uma “conexão íntima” entre os fenômenos. Cf. Jungnickel, 53-54.

²⁴⁹ *Ibid.*, 45.

²⁵⁰ *Ibid.*, 45, 47.

ajuda, Ohm teria pensado em recorrer aos seus pupilos, mas desistiu posteriormente.²⁵¹ No entanto, os biógrafos não dão detalhes sobre como teria sido realizado este auxílio. Ohm também não diz nada em seu trabalho sobre esta questão. Todo o artigo de 1843 é inteiramente teórico, baseado nos resultados obtidos pelos experimentos de Seebeck. Esta situação poderia gerar dúvidas sobre se estes experimentos teriam de fato acontecido. Todavia, em seu terceiro e último artigo sobre o som (1844), Ohm mencionou o auxílio de um amigo que teria tocado notas em seu violino para auxiliá-lo em sua pesquisa.²⁵² Toda esta situação torna-se curiosa, uma vez que o trabalho de 1843 se direciona aos resultados obtidos com a sirene. Se Ohm tivesse pedido para seu amigo tocar notas em um violino para a realização de seu artigo de 1843, os instrumentos seriam diferentes, o que não faria tanto sentido. Possivelmente ele assim o fez somente para seu trabalho de 1844, uma resposta às objeções de Seebeck, realizadas em 1843.

De qualquer forma, o próprio Ohm admitiu ter dificuldades em relação a ouvir os sons.²⁵³ Na recente pesquisa de Kromhout, consta que Ohm teria buscado uma definição estritamente matemática de tom por conta desta sua dificuldade. Em vista disso, o estudioso teria caminhado em direção ao campo da acústica, em oposição aos estudos mais antigos sobre o som, cujo foco seria mais musical.²⁵⁴ Tal hipótese não será debatida nesta tese, pois seria mudar seu foco. No entanto, cabe observar que, para uma melhor compreensão da pesquisa acústica do estudioso, é preciso dar atenção a determinados aspectos relacionados ao contexto que Ohm estava inserido e realizou seus trabalhos, conforme esta tese propõe-se a fazer.

Outro ponto importante a ser comentado do artigo de Kromhout, é sua conclusão de que, as dificuldades de Ohm para ouvir alguns sons, teriam levado a que seu interesse nos estudos acústicos fosse matemático.²⁵⁵ Em outras palavras, a matemática teria feito com que Ohm ingressasse nos estudos sobre o som. Contudo, um trabalho biográfico sobre Ohm afirma que a motivação para tal seria outra, ou seja, ele via as leis da natureza como simples e de grande escopo, ainda que os fenômenos fossem complexos e os caminhos para a compreensão destes fossem muito difíceis. Sendo assim, Ohm teria ingressado na área pelo fato de os últimos estudos em acústica estarem se afastando de tal princípio, interpretação que faz sentido. Além do mais, ao menos nos trabalhos analisados, Ohm parece ter utilizado a matemática como

²⁵¹ Von Füchtbauer, 228; Von Bauernfeind, 197.

²⁵² Ohm, „Noch ein paar“, 16.

²⁵³ Ibid., 17.

²⁵⁴ Kromhout, 488-89; 491.

²⁵⁵ Ibid., 473, 475, 477-478, 488-489.

ferramenta para descrever e explicar os fenômenos físicos e, portanto, mais como meio de investigação e não como finalidade. Em outras palavras, o estudioso não parecia estar interessado em questões matemáticas ao abordar a questão da definição de tom, mas em questões físicas. A série senoidal seria somente um instrumento para uma melhor compreensão física dos tons produzidos pela sirene. Isso posto, ainda que não seja descartada a influência da dificuldade auditiva de Ohm para que se utilizasse de uma ferramenta matemática para auxiliá-lo em suas investigações, outras motivações também parecem ter contribuído para tal utilização.

A respeito da relação entre as áreas da matemática e da física na visão de Ohm, pode-se citar as seguintes palavras do estudioso:

Durante muito tempo permaneci dividido entre matemática e física; mas considerando que na primeira a autoridade por vezes ousa jogar um jogo muito perverso e caprichoso, inclinei-me para esta última ciência, uma vez que de qualquer forma a primeira era tão facilmente associada à segunda.²⁵⁶

Ou seja, para Ohm, as áreas da matemática e física não precisariam estar necessariamente associadas, mas não seria difícil fazê-las andar juntas. E ao julgar por seus trabalhos, percebe-se que o estudioso achava muito útil esta associação. Além dos trabalhos sobre a corrente galvânica, o plano de Ohm de derivar todos os fenômenos físicos a partir da mecânica analítica e de hipóteses moleculares da época utilizando bases matemáticas reforça sua tendência unificadora e sua confiança no poder matemático.²⁵⁷ Deste modo, fica mais evidente a importância de se observar o papel da matemática em seus trabalhos em relação ao que era praticado ao seu redor.

A visão de Ohm choca-se com o que pensavam alguns estudiosos da época. De acordo com o que foi tratado no Capítulo 1, nem todos os estudiosos germânicos da época viam de bom grado a utilização da matemática nos estudos físicos. Além disso, a física matemática praticada no local de modo geral não era comparável à desenvolvida pelos estudiosos franceses,

²⁵⁶ Hartmann, 71. A carta foi enviada de Ohm para o ministério responsável pela administração das aulas solicitando um afastamento para a realização de suas pesquisas.

²⁵⁷ Ohm menciona a intenção de realizar tal empreendimento já em 1827, ano da publicação de *Die galvanische Kette*. Cf. Jungnickel, 58.

a qual Ohm tinha como importante referência.²⁵⁸ Por estes motivos, a maneira que Ohm fazia uso de ferramentas matemáticas dentro da física acabou confrontando a maneira de alguns estudiosos conduzirem suas pesquisas, o que também ajudaria a explicar a falta de um reconhecimento imediato de seus trabalhos sobre o galvanismo e sobre o som.

Esse choque está inserido em um contexto da entrada de trabalhos de estudiosos franceses em terras germânicas. Esse ingresso teria se dado a partir de traduções de trabalhos e inserções em livros-texto de física ou em publicações de periódicos germânicos, tais como o *Annalen*, a partir de traduções realizadas pelo antecessor de Poggendorff, Gilbert. Nesse contexto, a física matemática teria entrado de forma mais contínua em terras germânicas a partir da década de 1840, majoritariamente por meio de artigos relacionados à luz e à eletricidade.²⁵⁹

O contato com tais trabalhos teria aberto novas possibilidades para Ohm, tais como a utilização de ferramentas da análise matemática no estudo do som. Para o estudioso, a principal vantagem da análise matemática (vista como área de estudo) seria o fato de ela “considerar uma generalidade de ideias, por meio de suas expressões nunca vacilantes, o que demandaria continuamente renovados experimentos e assim possibilitaria um profundo conhecimento da natureza”²⁶⁰. Estando a generalidade conectada à abstração, a utilização de ferramentas de tal área acabou contribuindo para trazer um caráter mais abstrato (e teórico) a seus trabalhos. Na visão de Turner, essa característica do trabalho de Ohm teria sido fruto de um esforço do estudioso em torná-lo assim.²⁶¹ Todavia, essa questão parecia estar mais ligada ao poder que Ohm enxergava na matemática de revelar as leis físicas. Esta forma de se fazer ciência não parecia ser amplamente praticada à época de Ohm, mas paulatinamente passaria a ser cada vez mais. E Ohm estaria contribuindo para este processo, sendo uma das diversas pontes da difusão de um modo de se investigar os fenômenos físicos.²⁶²

²⁵⁸ Além do já abordado no Capítulo 1, a influência de trabalhos franceses é visível por meio dos relatórios de Gustav Theodor Fechner (1801-1887) sobre investigações dentro da física experimental e da física matemática. Fechner, no entanto, assume que não tinha proficiência nos conteúdos apresentados, mostrando uma diferença entre as pesquisas praticadas. Cf. Jungnickel, 61.

²⁵⁹ *Ibid.*, 31-32, 36. Garber, 165-66.

²⁶⁰ Ohm, *Die galvanische Kette*, apud Jungnickel, 55.

²⁶¹ Turner, 5.

²⁶² Esse ponto vai no mesmo sentido do que afirma Kromhout, que afirma que o papel da matemática como força direcionadora dos estudos dos fenômenos naturais distinguiu o trabalho de Ohm de muitos de seus contemporâneos. Para o autor, Ohm seria o expoente de uma mudança para um paradigma científico mais analítico com a redefinição das fronteiras da matemática pura, física experimental e física matemática. Cf. Kromhout, 474, 486. Sobre as mudanças ocorridas ao longo do século XIX na física praticada pelos germânicos, cf. Caneva, “From galvanism to electrodynamics”.

Neste processo, a possibilidade de abstração fornecida pela análise matemática acabou pavimentando o caminho para a transposição de uma ferramenta retirada dos estudos sobre o calor de Fourier para um contexto aparentemente diferente. Este caráter permitiu que Ohm mantivesse a tradição das funções senoidais também para os tons produzidos pela sirene, indo em direção a uma unificação.

O artigo de Ohm sobre a definição de tom de 1843 deu início a um debate com Seebeck sobre a composição de um tom produzido pela sirene e por outros instrumentos similares. O debate é bastante rico e acabará servindo de base para von Helmholtz desenvolver suas pesquisas em acústica fisiológica. No entanto, uma vez que esta disputa tenha sido largamente tratada pelos trabalhos anteriores de cunho histórico, e com o intuito de não se fugir do objeto de pesquisa desta tese, serão abordados nessa última parte somente os pontos que ajudam a entender a questão do papel das funções senoidais nos estudos do som, com o objetivo de mostrar o quanto a tradição do uso destas estava bem estabelecida, reforçando o argumento da defesa de uma tradição realizada por Ohm.

3.2 As funções senoidais na resposta de Seebeck

Logo após a publicação do artigo de 1843 por Ohm, Seebeck se apressou em publicar, no mesmo ano, uma resposta para contestar as explicações de seu oponente intelectual. Este trabalho de Seebeck, que teria dado início à discussão, foi seguido por mais um artigo de Ohm e outros dois trabalhos de Seebeck, todos publicados em 1844, cada um deles apresentando um teor contestatório em relação ao do seu oponente ao mesmo tempo que tratavam de detalhes sobre a questão da definição de um tom.

O artigo de Seebeck de 1843, o qual foi uma resposta imediata ao de Ohm, divide-se basicamente em três partes, além de uma introdução. De acordo com o próprio estudioso, a primeira (I) faz pequenas, mas significantes correções sem alterar a teoria de Ohm, a segunda (II) generaliza a teoria, mas mantendo a assunção de que a essência do som repousa sobre a mesma forma de onda e a terceira (III) assume uma forma de onda menos restritiva.²⁶³ Como é

²⁶³ Seebeck, “Ueber die Sirene”, 452-453.

possível perceber, nas duas primeiras partes a forma de onda se manteve e somente na terceira Seebeck iria propor uma nova (embora, como será visto, não será tão nova assim).

Uma questão que era extremamente importante para a acústica, segundo Seebeck é apontada logo na introdução de seu trabalho: “o que é considerado como o essencial das ondas de um tom, seja aquele que aparece sozinho ou simultaneamente com outros tons?”²⁶⁴. Esta questão seria parte de uma outra, sobre a qual ele vinha pensando há um longo tempo: “qual é a ideia da forma de onda característica de diferentes sons”²⁶⁵? Estas indagações colocadas no início são interessantes, pois mostram um pouco das preocupações de Seebeck e que refletiam as de outros estudiosos que investigavam o som à época.

Antes de iniciar propriamente seus argumentos contra a teoria de Ohm na parte I de seu trabalho, Seebeck faz uma consideração sobre uma afirmação de Ohm, a qual dizia que nenhuma outra causa deveria ser assumida para uma explicação de um acontecimento natural que não fosse necessária e suficiente. De acordo com Seebeck, este princípio “pode ser interpretado ou completado no sentido de que, para distinguir no campo do empirismo o que é assumido do que é provável e hipotético, não se pode limitar a ideia das causas essenciais de uma ocorrência para além das exigências absolutas da experiência.”²⁶⁶ Em vista disso, a experiência seria a grande balizadora do que deveria permanecer, ser modificado ou descartado da teoria de Ohm, de acordo com Seebeck. E é a ela que ele iria recorrer ao fazer suas críticas, as quais em grande parte estavam relacionadas ao confronto das intensidades previstas versus as intensidades ouvidas dos sons investigados, as quais não coincidiam. A parte I do trabalho de Seebeck é dedicada a mostrar algumas destas contradições a partir de alguns erros de cálculo ou escrita de Ohm em seu artigo. No fim desta parte, embora, Seebeck afirmou que não seria suficiente somente apontar os erros de Ohm para refutar sua assunção de forma de onda e por isso seguiu para a parte II, cuja ideia era manter a forma de onda e generalizar a teoria.²⁶⁷

Seebeck, portanto, reinterpreto a questão da necessidade e da suficiência colocada por Ohm como uma adequação da teoria aos resultados empíricos. E essa diferença de interpretação estaria por trás de caminhos diferentes que cada um estava seguindo. O primeiro indo por um caminho mais empírico e concreto e o segundo por um mais matemático e abstrato (embora

²⁶⁴ Ibid., 449.

²⁶⁵ Ibid., 449.

²⁶⁶ Ibid., 453.

²⁶⁷ Ibid., 460-461.

seja importante fazer a ponderação de que Ohm partiu dos primeiros experimentos de Seebeck, logo também via a parte empírica como importante).

Na parte II do trabalho, Seebeck irá partir da mesma forma de onda utilizada por Ohm, ou seja, do que este último estudioso chamou de “antiga definição”. Além disso, irá utilizar a própria série senoidal utilizada por Ohm no trabalho de 1843. No entanto, ele irá manipulá-la e chegar em outra expressão, entendendo que desta maneira a teoria seria generalizada. Seebeck iria utilizar os resultados com a sirene para aprofundar os resultados teóricos e para confrontá-los com a experiência, obtendo diferentes resultados em comparação aos de Ohm.²⁶⁸ De acordo com o estudioso, apesar de a hipótese da “antiga definição” ser confirmada na maioria das vezes, isso não havia acontecido em duas situações específicas, o que fez com que se opusesse a ela.²⁶⁹

Já na parte III, Seebeck propôs considerar a mesma série obtida na parte anterior, porém a partir de um certo termo. A ideia é que os termos de argumentos múltiplos combinados produziram um mesmo tom que somente o primeiro termo isoladamente, embora com uma diferença na qualidade do som.²⁷⁰ Por exemplo, se os argumentos dos termos da série fossem $\frac{\pi s}{l}$, $\frac{\pi(s+1)}{l}$, $\frac{\pi(s+2)}{l}$, ..., os quais são múltiplos de $\frac{\pi}{l}$, o resultado seria um tom de quantidade de oscilação $\frac{\pi}{l}$, embora com uma diferença na qualidade sonora. Para Seebeck, a forma da onda (básica) sendo considerada desta maneira seria menos limitada.

Destarte, é possível observar que mesmo a proposta de Seebeck de menor restrição sobre a forma da onda ainda se apoiava sobre as funções senoidais. Ou seja, a ideia estava tão consolidada que, embora o estudioso tenha pensado na ideia de se deixar em aberto a forma da onda, ele acaba retornando a ela.²⁷¹ E essa solidez parece ter sido adquirida principalmente a partir dos estudos sobre as cordas vibrantes, conforme tratado no Capítulo 2.

O que é ainda mais interessante é o fato de Seebeck não só ter baseado sua proposta nas funções senoidais, mas ter partido da própria série que Fourier tinha utilizado em seus estudos sobre o calor. Ou seja, apesar de ter se contraposto às ideias de Ohm, Seebeck acabou

²⁶⁸ Ibid., 462.

²⁶⁹ Ibid., 472.

²⁷⁰ Ibid., 474. A afirmação, portanto, toca na questão do timbre de um tom, ao contrário do artigo anterior de Ohm.

²⁷¹ Logo no início da primeira parte de seu artigo, Seebeck afirma que a explicação que deixa o movimento indefinido dentro do período é muito aberta e é, portanto, necessário uma restrição nesse movimento para se considerar um tom como simples. Cf. Seebeck, “Ueber die Sirene”, 453.

utilizando-se da própria ideia de seu oponente intelectual, que por sua vez estava relacionada a uma tradição bem estabelecida.

Está claro que a ideia da representação dos tons harmônicos pela função senoidal estava bem sedimentada à época, parte de uma tradição, a qual Ohm havia chamado de “a antiga definição de tom”, uma vez que Seebeck afirma:

Assume-se frequentemente que a velocidade, a qual uma partícula pertencente às ondas de um único tom no tempo t possui, é representada por $a \cos 2\pi(mt + \theta)$, em que a denota a amplitude de oscilação, m a quantidade de oscilação e θ um valor de tempo constante.²⁷²

De acordo com ele, a razão para tal representação vinha da teoria das vibrações, no caso mais simples e, nos casos menos simples, a matemática mais recente teria mostrado que a onda poderia ser reduzida a partes dessa forma. O estudioso afirmou que, em seu trabalho, pretendia examinar a correteza desta visão para a essência do som.²⁷³ Como foi visto há pouco, o próprio Seebeck chegou a propor um modelo alternativo ao de Ohm baseando-se no mesmo tipo de funções, embora combinando-as de modo diferente. A grande questão em relação à disputa se deu, não quanto ao uso ou não da série de Fourier, mas em termos de como seriam utilizadas estas funções para descrever o tom de uma sirene ou de instrumentos afins.

Seebeck também apontou que, no caso em que as impressões produzidas pela sirene estavam espaçadas em tempos t e t' alternadamente, não lhe havia escapado a semelhança de tal situação com a forma resultante a partir da combinação de duas sequências de ondas regulares.²⁷⁴ Esta combinação ele ilustrou por meio da figura a seguir:

²⁷² Ibid., 449-450.

²⁷³ Ibid., 450.

²⁷⁴ Ibid., 452.

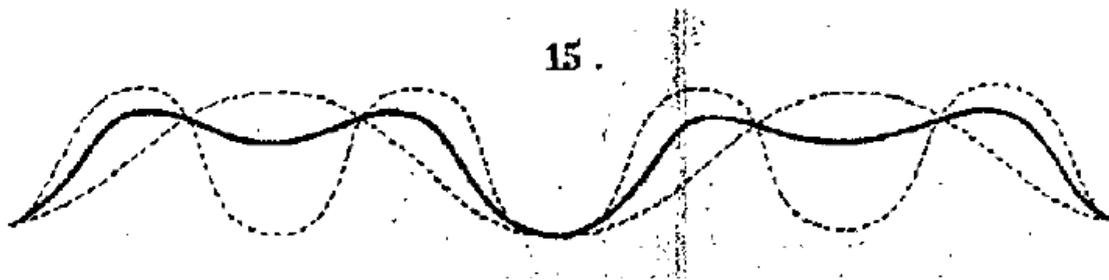


Figura 10: a combinação de duas funções senoidais, por Seebeck.²⁷⁵

A figura é semelhante à que Roeber apresenta em seu trabalho relativo aos tons de combinação e aos batimentos (ver Figura 9). Conforme abordado no Cap. 2, naquela figura cada ordenada da curva resultante era obtida a partir da média aritmética das ordenadas de ambas as curvas geradoras. Nessa acima, é possível ver que a curva resultante não é obtida por meio de uma média aritmética, mas possivelmente por uma média ponderada, o que também seria uma soma de senoides, embora com diferentes pesos. Ainda que esta ideia tendo sido apresentada depois do artigo de Ohm, Seebeck afirmou ter pensado sobre ela antes. Ou seja, as funções senoidais estavam sempre presentes nos estudos sobre o som da época. E a série utilizada por Fourier nada mais é do que uma soma infinita de senoides, o que é mais um ponto que ajudaria a entender a sua utilização por Ohm no contexto da acústica.

Porém, segundo Seebeck, Ohm teria fracassado em investigar a similaridade entre a situação ilustrada pela figura e a situação gerada a partir de seu experimento, mencionada anteriormente. Isso teria ocorrido, em suas palavras, por dois motivos: “pelo desconhecimento da composição da natureza íntima dos batimentos da sirene” e pela incerteza “sobre o que deveria ser considerado como pertencendo essencialmente à forma de onda de um tom”.²⁷⁶ Para Seebeck, Ohm tinha escapado destas dificuldades ao pressupor a forma $a \cos 2\pi(mt + \theta)$ como essência das ondas sonoras e é basicamente esta hipótese que Seebeck iria verificar em seu trabalho (o que também foi o objetivo de Ohm em seu artigo de 1843). A fala de Seebeck claramente reforça que a questão da essência de um tom em geral e do produzido pela sirene em particular era um assunto importante a ser investigado pelos estudiosos da época. No entanto, a abordagem de cada um era diferente: enquanto Ohm buscava uma lei geral por meio de análise matemática, Seebeck realizaria verificações empíricas. Mas assim como Seebeck

²⁷⁵ Seebeck “Ueber die Sirene”, anexo (Taf. I).

²⁷⁶ Ibid., 452.

também utilizaria a análise, Ohm não desprezava a experiência, embora possivelmente deixando para seu oponente tais verificações. O embate Ohm-Seebeck é sintomático da transformação em curso à época, de uma ciência germânica mais experimental e concreta para uma mais matematizada e abstrata.

Este artigo de Seebeck estimulou Ohm a apresentar outro em sua resposta. Em 1844, o estudioso publicou o artigo intitulado „Noch ein Paar Worte über die Definition des Tones“(Mais algumas palavras sobre a definição do tom), dando continuidade à disputa cujo cerne era estabelecer qual forma de onda, da qual qualquer tom seria constituído, seria assumida como básica. Como foi visto, Seebeck rejeitou a forma de onda defendida por Ohm e propôs uma nova, embora também baseada em funções senoidais. Em seu último trabalho a respeito do som, Ohm continuaria a defender a sua forma inicialmente proposta e, obviamente, rejeitar a de Seebeck. Para tal, o estudioso faria uso de argumentos variados. Não cabe entrar nesses aspectos, pois acredita-se que o que orbita em torno do objeto de estudo da presente pesquisa já foi suficientemente abordado. O leitor que se interessar por saber os detalhes pode consultar trabalhos como os de Turner e de Vogel, que tratam do tema com grande competência, incluindo a recepção da disputa por von Helmholtz e como este estudioso fez uso das ideias surgidas a partir do debate.

Considerações finais

Ohm estava inserido em uma sociedade na qual estavam ocorrendo diversas mudanças políticas e sociais, as quais por sua vez impactaram a educação e a ciência praticadas à época. Na questão geopolítica, nem as fronteiras dos reinados germânicos estavam bem definidas após a derrota de Napoleão e o Congresso de Viena. Devido aos conflitos, os germânicos não estavam em boas condições econômicas e sociais e buscavam se reerguer. Uma das medidas tomadas nesse sentido pela Prússia foi a implementação de uma reforma educacional de bases neo-humanistas, cujo expoente foi W. von Humboldt. Além da reforma, pouco a pouco ideias de estudiosos estrangeiros foram adentrando as terras germânicas, modificando a forma de se fazer ciência no local.

Os trabalhos e a postura de Ohm são representativos destes momentos de transição. Ao mesmo tempo em que o estudioso buscava defender tradições, acabou inovando ao utilizar ferramentas que não eram largamente utilizadas em terras germânicas por inspiração de trabalhos franceses, inclusive de períodos anteriores. Deste modo, ele parece ter contribuído para esse intercâmbio franco-germânico de conhecimento, cujas principais vias teriam sido os periódicos e livros-texto germânicos, os quais veicularam trabalhos de estudiosos franceses. Neste contexto, é possível enxergar rupturas e permanências nos trabalhos acústicos de Ohm.

Como foi discutido amplamente nos capítulos anteriores, é muito claro que o objetivo primordial de seu artigo de 1843 sobre a definição de tom era defender a tradição das funções senoidais como representativas de um tom. Nele, o estudioso faz um grande esforço para mostrar que estas eram tão condizentes com os tons produzidos pela sirene de Seebeck quanto com as cordas vibrantes que foram largamente estudadas e debatidas no século XVIII. No entanto, mesmo para as cordas vibrantes, apesar dos resultados apresentados por Ohm, as funções senoidais não foram aceitas tão facilmente, encontrando resistência de estudiosos de peso. Mas também houve seus defensores, os quais conseguiram, ao menos, fazer com que elas resistissem à virada de século.

Ainda nesse contexto, os “novos” instrumentos de produção de tons haviam colocado os defensores da tradição senoidal em um imbróglio. Tanto a sirene de Cagniard quanto a roda dentada de Savart foram utilizadas para estudar propriedades do som e chamaram atenção pela sua maneira de produzi-lo. Além de serem instrumentos experimentais, ou seja, construídos com o objetivo realizarem experimentos (ao contrário dos instrumentos musicais), eles produziam tons por meio de pulsos aparentemente descontínuos. Surgia, assim, um também novo problema a ser resolvido: como verificar se os tons produzidos por estes instrumentos também caberiam nesta tradição? Esta era a tarefa para a qual Ohm empregou a ferramenta matemática em questão. No entanto, a utilização das funções senoidais pela série de Fourier como ferramenta explicativa dos tons da sirene não é direta. Ohm iria encontrar outra dificuldade, pois, como ele mesmo afirmou, seu ouvido era não musical, o que teria dificultado seu trabalho em relação a investigar os sons. Esta dificuldade parece ter dado um bom motivo, embora não fosse o único, para ele decidir pelo uso da série senoidal de Fourier. O resultado, teria sido, assim, sido utilizado como uma ferramenta para auxiliá-lo a superar as limitações impostas pelos sentidos.

Dessa forma, Ohm contribuiu para a permanência das funções senoidais quando lançou mão da série de Fourier de uma maneira inovadora. Seebeck, por seu lado, oferece certa resistência frente a teoria de Ohm, mas sua contraproposta acaba sendo também baseada em funções senoidais, o que mostra o quanto já haveria uma sólida tradição do uso delas em contextos sonoros à época. Ademais, Roeber, que estava responsável por escrever uma compilação das principais pesquisas acústicas da época, também as usa como base para descrever um tom de combinação. E Ohm não somente fez uso das funções senoidais em seu artigo sobre a definição de tom, como também as defendeu das objeções postas por Seebeck.

Há também uma permanência implícita promovida por Ohm: a da teoria da superposição dos modos de vibração, originalmente proposta por D. Bernoulli para explicar a simultaneidade dos harmônicos produzidos por uma corda e que foi estendida para outros corpos vibrantes. A ideia passa por debates no século XVIII, chegando a Fourier, que a menciona, conforme abordado no Capítulo 2. Quando Ohm utilizou a série senoidal para explicar os tons produzidos pela sirene, implicitamente acabou estendendo a ideia para o novo contexto, indo na direção de uma teoria mais geral.

A esse respeito, é preciso observar que o estudioso também mostrou uma tendência de unificar fenômenos e áreas em suas pesquisas. Assim, seu livro de 1827 sobre o galvanismo é um grande exemplo desta postura; da mesma forma, em seu artigo sobre a definição de tom de 1843, uma postura similar foi mantida. Dizer que as funções senoidais também representavam os tons produzidos pela sirene ou que estes eram formados por tais funções colocou todas as formas de produção de som sob o mesmo guarda-chuva. Nesse aspecto Ohm caminhava em uma direção totalmente oposta à de Seebeck que fazia questão de frisar que seus resultados obtidos com a sirene não poderiam ser transferidos a outros instrumentos. Essa forma de se fazer ciência remete à *Naturphilosophie*, embora não seja possível afirmar que o estudioso tenha sofrido influência direta desta corrente de pensamento. Pelo contrário, nesta tese foi abordada a resistência de seus adeptos ao modo de se fazer ciência de Ohm. Mas, de qualquer modo, analogias e conexões foram realizadas pelo estudioso, fazendo que caminhasse em direção a uma unidade, como preconizava tal corrente de pensamento, bem como almejavam os irmãos Weber em relação a uma teoria única das ondas.

Nessa forma de se estudar os fenômenos, a matemática teria papel fundamental, uma vez que o caráter abstrato de seus objetos de estudo possibilitaria a utilização destes como ferramentas em diferentes contextos. Como foi abordado, Fourier aproveitou ideias

matemáticas desenvolvidas em estudos sobre o som em seus estudos sobre o calor. Foi justamente a abstração de ideias matemáticas que lhe permitiu fazer isso, ao mesmo tempo em que permitiu que Ohm as levasse de volta ao seu local de origem, ou seja, os estudos sobre o som.

Foram abordados alguns comentários de Fourier que aproximavam som e calor e que provavelmente estavam relacionados com sua forma de trabalhar. Ohm não teria feito menção explícita a algo do tipo, mas também realizou analogias e conexões, não se preocupando com uma representação pictórica, característica dos estudiosos germânicos mais antigos. É mais provável que esta forma de trabalhar tenha sido fruto do contato com investigações francesas do que algo relacionado à *Naturphilosophie*, a corrente de pensamento que, por questões ideológicas, lhe proporcionou obstáculos bastante práticos.

A crítica do *Naturphilosopher* Pohl a Ohm por este não ter prestado atenção à essência da corrente galvânica é significativa. Esse descolar da essência que Pohl se referiu seria explicado pela forma mais abstrata de utilização da matemática que Ohm empreendeu em comparação com o que seu crítico esperava. No entanto, embora seu adversário pensasse o contrário, Ohm se via como alguém que estava investigando a essência do fenômeno ao se utilizar de ferramentas matemáticas em seu estudo sobre a definição de tom. E isso seria feito por meio da enunciação de leis de grande simplicidade e generalidade, o que também está de acordo com o que pensava Fourier. Aliás, o motivo de Ohm ter ingressado na área de estudos da acústica teria sido o fato de as interpretações nesta área estarem caminhando em um sentido oposto, o que ele achava perigoso.

Ohm utilizou a análise matemática em seu trabalho sobre a definição de tom, porque entendia que a “tocha da matemática” poderia iluminar a área da acústica, a qual estaria sob certa penumbra. Sua grande confiança no poder matemático de elucidação de questões físicas parece ser oriunda da sua formação (não somente no sentido estrito da palavra, com relação a instituições, mas também relacionada a seus estudos informais) e do contato com os trabalhos dos estudiosos franceses. Ohm estava contribuindo para mudar pouco a pouco a forma de se fazer ciência em terras germânicas, abrindo caminho para maneiras mais abstratas de se tratar os fenômenos.

Em síntese, Ohm estaria defendendo a tradição das funções senoidais, baseado em seu arcabouço teórico, incluindo referências dos trabalhos dos estudiosos franceses. Estes teriam

fornecido ferramentas e possivelmente uma forma de se trabalhar um pouco mais abstrata, dada a dificuldade de apreensão e compreensão dos fenômenos direta pelos sentidos, forma que permitiu a movimentação do estudioso em direção a uma análise que unificaria os tons produzidos pelos diferentes instrumentos produtores de sons, fossem musicais ou não.

Um manuscrito de Ohm intitulado *Gedanken über Wissen und Gelehrsamkeit* (Pensamentos sobre saber e erudição), encontrado no *Deutsches Museum*, poderia ser um caminho para entender melhor como o estudioso enxergava a ciência auxiliando na compreensão de seus trabalhos acústicos.²⁷⁷ Todavia, a abordagem de tal documento demandaria um tempo que não seria suficiente para o desenvolvimento desta tese. Em vista disso, uma possibilidade de trabalho futuro é o estudo deste documento, bem como de um aprofundamento das investigações sobre as ideias circulantes à época.

Referências

- Alfonso-Goldfarb, Ana M. "2. Centenário Simão Mathias: Documentos, Métodos e Identidade da História da Ciência." *Circumscribere* 4 (2008): 5-9.
- Alfonso-Goldfarb, Ana M., Márcia H. M. Ferraz, & Patrícia Aceves. "Uma 'Viagem' entre Documentos e Fontes." *Circumscribere* 12 (2012): v-viii.
- Von Bauernfeind, Carl M. "Georg Ohm." In *Allgemeine deutsche Biographie* XXIV, Leipzig: Duncker & Humblot, 1887.
- Beyer, Robert T. *Sounds of our times, two hundred years of acoustics*. New York: Springer-Verlag, 1999.
- Boria, Francesco, & Barbara Rapaccini. "Education and research: the development of German physics in the nineteenth century—part one." *Lettera Matematica* 6, n° 3 (2018): 161-166.

²⁷⁷ Ohm, *Gedanken über Wissen*.

- Boring, Edwin G. *Sensation and perception in the history of experimental psychology*. New York: D. Appleton-Century Company, Inc., 1942.
- Caneva, Kenneth L. "From galvanism to electrodynamics: The transformation of German physics and its social context." *Historical studies in the physical sciences* 9 (1978): 63-159.
- _____. "Georg Simon Ohm." In *Dictionary of Scientific Biography* 10, org. Charles C. Gillispie, 186-194. New York: Charles Scribner's Sons, 1981.
- Carazza, Bruno. & Guidetti, Gian P. "Helmholtz, la "legge di Ohm" e il problema dell'armonia." *Giornale di Fisica* 30, n° 3 (1989): 207-214.
- Caruso, Marcelo. "Liberal governance and the making of hierarchies: Oberlehrer in Munich's elementary schools (1871–1918)." *Journal of Educational Administration and History* 41, n° 3 (2009): 223-237.
- Chladni, Ernst F. F. *Kurze Uebersicht der Schall-und Klanglehre: nebst einem Anhang die Entwicklung und Anordnung der Tonverhältnisse betreffend*. Mainz: Schott, 1827.
- Comte, Auguste. "Curso de filosofia positiva". In: *Comte, Coleção Os Pensadores*. São Paulo: Abril Cultural, 1983.
- Darrigol, Olivier. "The acoustic origins of harmonic analysis." *Archive for history of exact sciences* 61, n° 4 (2007): 343-424.
- Deuerlein, Ernst G. *Georg Simon Ohm 1789-1854: Leben und Wirken des grossen Physikers*. Erlangen: Verlag Palm & Enke, 1954 (1939).
- _____. *Höhere technische Staatslehranstalt Nürnberg 1833-1933*. Nürnberg: W. Tümmels Buchdruckerei G. m. b. H., s. d.
- Dostrovsky, Sigalia. "Ernst Florenz Friedrich Chladni". In: *Dictionary of scientific biography* 3, org. Charles C. Gillispie, 258-259. New York: Charles Scribner's Sons, 1981.
- _____. "Félix Savart". In: *Dictionary of scientific biography* 12, org. Charles C. Gillispie, 143-144. New York: Charles Scribner's Sons, 1981.

- Dove, Heinrich W. & Moser Ludwig, orgs. *Repertorium der Physik 1*. Berlin: Veit & Comp., 1837.
- _____, org. *Repertorium der Physik 3*. Berlin: Veit & Comp., 1839.
- Ferraz, Márcia H. M., Ana M. Alfonso-Goldfarb, & Silvia Waisse. "Reflexões sobre a constituição de um corpo documental para a história da ciência: um estudo de caso do Brasil colônia e Brasil reino." *Reflexões* 26, n° 1 (2013).
- Fix, Adam. "A Science Superior to Music: Joseph Sauveur and the Estrangement between Music and Acoustics." *Physics in Perspective* 17, n° 3 (2015): 173-197.
- Fourier, Jean B. J., Pierre Costable, and John Herivel. *Face aux objections contre sa théorie de la chaleur: Lettres inédites 1808-1816*. Bibl. nat., 1980.
- _____. "Mémoire sur la propagation de la chaleur dans les corps solides." *Nouveau Bulletin des Sciences par la Société philomathique de Paris I*, n° 6 (1808): 112-116.
- _____. "Mémoire sur la statique contenant la démonstration du principe des vitesses virtuelles et la théorie des moments." *Journal de l'École Polytechnique* 20, (1798): 477-521.
- _____. *Théorie analytique de la chaleur*. Paris: F. Didot, 1822.
- _____. *The analytical theory of heat*, Trad. Alexander Freeman. Cambridge: The University Press, 1878.
- Fuchs, Guido W. "Annalen der Physik—a brief history of a living legend." *Ann. Phys* 7 (2011): A7-A12.
- Von Füchtbauer, Heinrich R., Ernst Deuerlein & Christian Füchtbauer. *Georg Simon Ohm: ein Forscher wächst aus seiner Väter art*. Bonn: Ferd. Dümmlers, 1939.
- Garber, Elizabeth. *The Language of Physics: The Calculus and the Development of Theoretical Physics in Europe, 1750-1914*. Boston: Birkhäuser, 2001.
- Gee, B. "Georg Simon Ohm 1789-1854." *Physics Education* 4, n° 2 (1969): 106-113.

- Gerlach, Walther. "Georg Simon Ohm." In: *Humanität und naturwissenschaftliche Forschung*, 91-103. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1962.
- Gouk, Penelope. "The role of acoustics and music theory in the scientific work of Robert Hooke." *Annals of science* 37, n°5 (1980): 573-605.
- Grattan-Guinness, Ivor, and Jerome R. Ravetz. *Joseph Fourier, 1768-1830: A Survey of His Life and Work*. Cambridge: MIT Press, 2003.
- Greenslade Jr, Thomas B. "The Siren." *The Physics Teacher* 42, n° 7 (2004): 418-421.
- Hällström, Gustavus G. *De tonis combinationis*. Diss. Aboae: Typis Frenckellianis, 1819.
- Hartmann, Ludwig. *Georg Simon Ohm: Briefe, Urkunden und Dokumente*. Hamburg: Severus Verlag, 2014 (1927).
- Ingleton, Holly. "Recalibrating fundamentals of discipline and desire through the Automatic music tent." *Contemporary Music Review* 35, n° 1 (2016): 71-84.
- Heidelberger, Michael. "Some patterns of change in the Baconian Sciences of the early 19th century Germany." In: *Epistemological and Social Problems of the Sciences in the Early Nineteenth Century*, org. Hans N. Jahnke & Michael Otte, 3-18. Dordrecht, Boston, London: Springer 1981.
- Von Helmholtz, Hermann L. F. *On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music*, 3rd edition. Trad. Alexander J. Ellis. London, New York: Longmans, Green, and Co., 1895.
- Inwood, Stephen. *The man who knew too much: the strange and inventive life of Robert Hooke, 1635-1703*. London: Pan Macmillan, 2003.
- Jackson, Myles W. "From scientific instruments to musical instruments: The tuning fork, the metronome, and the siren." In: *The Oxford Handbook of Sound Studies*, org. Trevor Pinch & Karin Bijsterveld, 201-223. New York: Oxford University Press, 2012.
- _____. *Harmonious triads: physicists, musicians, and instrument makers in nineteenth-century Germany*. Cambridge, Massachusetts; London, England: MIT Press, 2006.

- _____. "Physics and music in nineteenth-century Prussia: Wilhelm Eduard Weber and precision measurement." *Interdisciplinary Science Reviews* 31, n° 4 (2006): 307-322.
- Jungnickel, Christa, and Russell McCormmach. *Intellectual mastery of nature: Theoretical physics from Ohm to Einstein*, Vol. 1: The torch of mathematics, 1800 to 1870. Chicago and London: The University of Chicago Press, 1986.
- Kitchen, Martin. *História da Alemanha moderna: de 1800 aos dias de hoje*. Trad. Cláudia Gerpe Duarte. São Paulo: Editora Cultrix, 2013.
- Krause, Karl E. H. „August Seebeck“. In: *Allgemeine Deutsche Biographie* XXXIII, 559-560. Leipzig: Duncker & Humblot, 1891.
- Kromhout, Melle J. "The Unmusical Ear: Georg Simon Ohm and the Mathematical Analysis of Sound." *Isis* 111, n° 3 (2020): 471-492.
- Kützing, Carl. *Beiträge zur praktischen Akustik als Nachtrag zur Fortepiano-und Orgelbaukunst*. Bern, Chur e Leipzig: JFJ Dalp, 1838.
- Lindsay, Robert B. "The Story of Acoustics". *The Journal of the Acoustical Society of America* 39, n° 4 (1966): 629-644.
- Lloyd, L. S. "Electronic Organs and the Phonodeik", *The Musical Times* 79, n° 1147 (1938): 682-685.
- Lommel, Eugen. "The scientific work of George Simon Ohm." In: *Annual report of the boards of regents of the Smithsonian Institution*, trad. William Hallock. Washington: Government Printing Office, 1893.
- Maley Jr., Vaughn C. "The theory of beats and combination tones, 1700-1863". Tese de doutorado em História da Ciência, Universidade de Harvard, 1990.
- McKnight, John N. "Laboratory Notebooks of G. S. Ohm: A Case Study in Experimental Method." *American Journal of Physics* 35, n° 2 (1967): 110-114.

- Ohm, Georg S. „Beschreibung einiger einfachen und leicht zu behandelnden Vorrichtungen zur Anstellung der Licht Interferenz-Versuche“. *Annalen der Physik und Chemie* 49, (1840): 98-108.
- _____. „Bemerkungen über Combinationstöne und Stösse.“ *Annalen der Physik und Chemie* 47, (1839): 463-465.
- _____. *Die galvanische kette: mathematisch bearbeitet*. Berlin: T. H. Riemann, 1827.
- _____. *Gedanken über Wissen und Gelehrsamkeit* (NL 267/014). Deutsches Museum, 1817-1826.
- _____. „Noch ein Paar Worte über die Definition des Tones“, *Annalen der Physik und Chemie* 62, n° 5 (1844): 1-18.
- _____. „The Galvanic Circuit Investigated Mathematically.“ In: *Taylor, Scientif. Mem.* II, (1841): 401-436, 437-506.
- _____. „Über die Definition des Tones, nebst daran geknüpfter Theorie der Sirene und ähnlicher tonbildender Vorrichtungen.“ *Annalen der Physik und Chemie* 59, n° 8 (1843): 513-565.
- _____. "Vorläufige Anzeige des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontaktelektricität leiten." *Annalen der Physik* 4 (1825): 79-88; *Journal für Chemie und Physik* 44 (1825): 110-118.
- Paulsen, Friedrich. *German education: Past and present*. Trad. T. Lorenz. New York: Charles Scribner's Sons, 1908.
- Payen, Jaques. „Cagniard de la Tour“. In: *Dictionary of Scientific Biography* 3, org. Charles C. Gillispie, 8-10. New York: Charles Scribner's Sons, 1981.
- Ravetz, Jerome, & Ivor Grattan-Guinness. "Joseph Fourier". In: *Dictionary of Scientific Biography* 5, 93-99. New York: Charles Scribner's Sons, 1972.
- Robison, John. *A system of mechanical philosophy*. Vol. 4. Edinburg; London: John Murray, 2014.

- Robel, Ernst. *Die Sirenen: Ein Beitrag zur Entwicklungsgeschichte der Akustik. Teil I.* Berlin: R. Gaertners Verlagsbuchhandlung, 1891.
- _____. *Die Sirenen: Ein Beitrag zur Entwicklungsgeschichte der Akustik. Teil II. Die Arbeiten deutscher Physiker über die Sirene in dem Zeitraume von 1830 bis 1856.* Berlin: R. Gaertners Verlagsbuchhandlung, 1891.
- Roeber, August. „Combinationstöne und Stösse“. In: *Repertorium der Physik* 3, 9^a seção (Akustik), (1839): 1-53.
- Rogerson, John. *Old Testament criticism in the nineteenth century: England and Germany.* Wipf and Stock Publishers, 2010.
- Sauveur, Joseph. *Principes d'acoustique et de musique: ou, Système général des intervalles des sons & de son application à tous les systèmes & à tous les instrumens de musique.* Paris: Academie Royal des Sciences, 1701.
- Savart, Félix. "Notes sur la sensibilité de l'organe de l'ouïe." *Annales de Chimie et de Physique* 44, (1830): 337-352.
- Seebeck, August L. F. W. "Beobachtungen über einige Bedingungen der Entstehung von Tönen." *Annalen der Physik und Chemie* 53, n° 7 (1841): 417-436.
- _____. "Ueber die sirene." *Annalen der Physik* 60, n° 12 (1843): 449-481.
- De la Tour, Charles C. "Sur la Sirène, nouvelle machine d'acoustique destinée à mesurer les vibrations de l'air qui constituent le son." *Annales de chimie et de physique* 12, (1819): 167-171.
- Truesdell, Clifford. *The rational mechanics of flexible or elastic bodies: 1638-1788. Introduction to Leonhardi Euleri Opera Omnia vol. X et XI, Seriei secundae.* Basel: Birkhäuser, 1960.
- Turner, Roy S. "The Ohm-Seebeck dispute, Hermann von Helmholtz, and the origins of physiological acoustics". *The British Journal for the History of Science* 10, n° 1 (1977): 1-24.

- Ullmann, Dieter. *Chladni und die Entwicklung der Akustik von 1750–1860*. Basel; Boston; Berlin: Birkhäuser, 1996.
- _____. "Ohm-Seebeck-Helmholtz und das Klangfarbenproblem." *NTM* 25, n° 1 (1988): 65-68.
- Veyne, Paul. *Como se escreve a história e Foucault revoluciona a história*. 4ª ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1998.
- Vogel, Stephan. "Sensation of tone, perception of sound, and empiricism: Helmholtz's physiological acoustics." In: *Hermann von Helmholtz and the foundations of nineteenth century science*, org. David Cahan, 259-287. Berkeley: University of California Press, 1993.
- Waise-Priven, Silvia I. *d&D: duplo Dilema du Bois-Reymond e Driesch, ou a vitalidade do vitalismo*. São Paulo: FAPESP, EDUC, 2009.
- Wallis, John. "Dr. Wallis's Letter to the Publisher, Concerning a New Musical Discovery". *Philosophical Transactions* 12, n° 134 (1665-1678): 839-842