

Desenvolvimento de uma mesa giratória para aplicação em ensino multidisciplinar nas áreas de Engenharia Elétrica, Eletrônica e Acústica

Eduardo Minuzzi Viera
Programa de Pós-Grad. em
Engenharia Elétrica (PPGEE)
Univ. Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS, Brasil
eduardo.viera@eac.ufsm.br
0000-0002-4533-7542

William D'Andrea Fonseca
Engenharia Acústica (EAC) &
Pós-Grad. Arq., Urb. e P. (PPGAUP)
Univ. Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS, Brasil
will.fonseca@eac.ufsm.br
0000-0003-3439-5963

Álysson Raniere Seidel
Col. Téc. Ind. de S. Maria (CTISM) &
Pós-Grad. Eng. Elétrica (PPGEE)
Univ. Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS, Brasil
seidel@ctism.ufsm.br
0000-0003-0634-5790

Maikel Fernando Menke
Colégio Técnico Industrial
de Santa Maria (CTISM)
Univ. Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS, Brasil
maikel.menke@ufsm.br
0000-0002-6025-7129

João Pedro Cipriani
Programa de Pós-Grad. em
Engenharia Elétrica (PPGEE)
Univ. Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS, Brasil
joao.cipriani@acad.ufsm.br
0000-0002-7775-8069

Resumo—A participação ativa dos discentes em aulas práticas nas instituições universitárias potencializa significativamente o processo de assimilação do conhecimento. Neste panorama, o presente artigo apresenta a concepção metódica e a implementação de uma mesa giratória, com especial atenção às vertentes da Engenharia Elétrica e Acústica. O artigo explora as bases conceituais e os procedimentos intrínsecos à materialização deste instrumento, sublinhando sua relevância como dispositivo pedagógico multidisciplinar. Vale ainda ressaltar que, sua proeminência não se restringe somente à capacitação prática nas esferas das engenharias, mas também permeia o campo da pesquisa científica. A contribuição deste trabalho é dual: inicialmente, delinea-se uma metodologia sequencial para a confecção da mesa giratória, otimizada para ser conduzida por docentes e discentes sob o paradigma de metodologias ativas de ensino. Na sequência, apresentam-se casos práticos oriundos da aplicação versátil dessa ferramenta, atestando sua significância e potencial impacto no âmbito educacional e técnico da engenharia.

Palavras-chave—dispositivo eletromecânico, *turntable*, mesa giratória, motor de passo, microcontrolador, Arduino, ensino para engenharia, ensino ativo, medições acústicas, direcionalidade sonora, eletrônica de potência, ruído elétrico, ruído sonoro.

I. INTRODUÇÃO

No campo da Engenharia, em particular nos cursos de Engenharia Elétrica, Eletrônica Industrial e Acústica, é essencial oferecer aos discentes experiências práticas que enriqueçam seu arcabouço teórico. Uma abordagem promissora para alcançar tal complementaridade é por meio do *ensino ativo* [1]. Dentre tais metodologias, o ensino de *cunho mão na massa* se destaca, promovendo um aprendizado prático que potencializa a assimilação de conhecimento, catalisando a transformação de conceitos abstratos em aplicações concretas.

A motivação inicial do projeto deste artigo — uma *mesa giratória* — emergiu a partir de pesquisas realizadas em duas frentes, a saber: (i) a caracterização do ruído acústico gerado por dispositivos elétricos, como os *drivers* utilizados para acionar LEDs, inversores fotovoltaicos e carregadores de baterias de veículos elétricos. O ruído acústico resultante desses dispositivos (um efeito colateral secundário) pode provocar efeitos prejudiciais sobre os seres vivos que compartilham o mesmo

ambiente [2], incluindo efeitos auditivos e extra-auditivos. A segunda vertente de investigação (ii) que deu sustentação a este trabalho foca na elucidação da resposta direcional de fontes sonoras (em geral), englobando alto-falantes (categorizados como transdutores eletromecânico-acústicos) e os já citados dispositivos elétricos.

Diante dos custos expressivos inerentes à aquisição de equipamentos didáticos, abre-se uma janela de oportunidade para que docentes e discentes dos cursos de engenharia elaborem suas próprias soluções, visando fomentar o ensino ativo e a criação de ferramentas laboratoriais. Nesse contexto, o presente trabalho foca na concepção, implementação e aplicação de um dispositivo eletromecânico: uma mesa giratória, também conhecida como *turntable*. Esse instrumento objetiva permitir a aplicação prática dos conceitos trabalhados em sala de aula (tanto no domínio elétrico quanto acústico). Dado o cenário de escassez de equipamentos laboratoriais em instituições brasileiras, especialmente no campo da eletrônica de potência [3], este estudo propõe-se a oferecer uma alternativa viável, contribuindo com uma ferramenta valiosa para pesquisa e ensino.

Com isso em mente, este artigo detalha o processo de criação de um dispositivo custo-efetivo capaz de rotacionar objetos com precisão e exatidão no movimento, mantendo o torque adequado para os equipamentos em análise. É importante salientar que, apesar da existência de soluções comerciais com finalidades semelhantes, muitas apresentam custos elevados e podem carecer da adaptabilidade requerida. Um dos critérios cruciais na etapa de projeto da mesa giratória é sua compatibilidade com plataformas populares de programação e desenvolvimento, como Matlab e Python. Isso amplia seu escopo de uso em ambientes educacionais e laboratórios.

Este trabalho segue duas diretrizes claras. A primeira delas se aprofunda na concepção e nas etapas construtivas da mesa giratória, trazendo *insights* valiosos para educadores e alunos (Seção II). Há um potencial para que fases intermediárias (como *design* e testes) se tornem parte integrante de atividades didáticas em engenharia, fomentando a interação colaborativa

entre docentes e discentes. Por sua vez, a segunda direção foca nas aplicações multidisciplinares da mesa, complementadas por ferramentas adicionais, como dispositivos de medição e processamento de sinais (Seção III).

II. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA MESA GIRATÓRIA

Uma *mesa giratória* é uma ferramenta eletromecânica amplamente adotada em diversas vertentes da engenharia. Seu principal propósito é permitir a rotação controlada de um objeto ao redor de um eixo central, o qual também é responsável por suportar sua carga. Devido à sua versatilidade, a mesa giratória tem potencial de aplicação em uma ampla variedade de contextos.

A configuração completa desse dispositivo engloba componentes vitais para sua operação. Estes são: (1) um motor, que atua como o propulsor do movimento rotativo; (2) um sistema de transmissão, incumbido de transferir o torque oriundo do motor até a superfície rotativa; e (3) um *sistema de controle*, que administra a velocidade, a trajetória do movimento e o grau de rotação. A interação harmônica entre esses componentes garante a rotação controlada do objeto acoplado ao eixo do motor [4].

No âmbito educacional, o projeto integral deste aparato pode ser categorizado em duas fases principais. A primeira refere-se ao desenvolvimento físico da mesa giratória, envolvendo a seleção e análise do motor de passo, definição de conectores e montagem geral do sistema. A segunda aborda a criação do *sistema de controle*: desde a escolha do microcontrolador e desenvolvimento do *firmware* (estabelecendo o protocolo de comunicação) até a determinação da fonte de alimentação e do *driver* (para o motor de passo selecionado).

Este planejamento em fases facilita a implementação didática. Em cenários acadêmicos, permite-se iniciar com os conceitos básicos, evoluindo para etapas mais complexas de desenvolvimento e, por fim, avançando para testes e aplicações práticas em contextos reais.

A. Definição do motor e desenvolvimento da mesa giratória

Para este projeto, foram selecionados dois dispositivos distintos para servir como cargas mecânicas de referência para o motor da mesa giratória: (a) um inversor de frequências comercial ecoSolys de 2 kW, pesando 9,3 kg [5] e (b) um *simulador de cabeça e tronco*¹ da Brüel & Kjær, que tem um peso aproximado de 9 kg [7]. Essas escolhas são pautadas pelas afinidades imediatas de utilização da mesa em projeto, considerando possíveis elementos *pesados* que o eixo tem que suportar. Esse parâmetro foi crucial para definir a capacidade do motor e selecionar um *driver* compatível.

Com base nas cargas mecânicas estabelecidas, a escolha recaiu sobre o *motor de passo* modelo NEMA 23 JK57HS112-3004, que apresenta um torque de 28 kgf-cm, conforme especificado no seu *datasheet* [8]. Esse motor requer uma corrente operacional de 3 A.

Na fase de construção, a mesa giratória foi desenhada de forma modular, compreendendo duas unidades principais: a

¹É um aparato classificado como *cabeça artificial (Head-And-Torso Simulator, HATS)* por fazer gravações sonoras (biauriculares) similares a um ser humano [6]. É possível observar um modelo no centro da Figura 6.

mesa em si e o sistema de controle (e energização). Ambas foram alojadas em *cases* de MDF com paredes de 14 mm de espessura. Esse *design* modular não apenas confere robustez ao dispositivo, mas também minimiza potenciais interferências — como ruídos ou aquecimento — provenientes do sistema de controle. Esta característica é especialmente relevante quando se consideram aplicações da mesa giratória em ambientes silenciosos como câmaras anecoicas.

A unidade da mesa é compacta, medindo 30 cm × 30 cm por 16 cm de altura, sendo projetada para garantir estabilidade durante a operação. Ela aloja exclusivamente o motor de passo e um conector *Mike* macho de 8 vias. A Figura 1 ilustra o protótipo, destacando detalhes como a fixação do motor e a conexão com a interface. A interconexão entre a mesa e o sistema de controle é estabelecida através de um cabo de 3 m, equipado com conectores *Mike* fêmea de 8 vias em ambas as extremidades (observe a Figura 2).



(a) Visão inferior da mesa giratória aberta.



(b) Mesa giratória fechada.

Figura 1: Mesa giratória desenvolvida.

Conforme a necessidade da aplicação, podem-se escolher ou projetar formas de fixação ou plataformas adequadas. Itens mais leves, como um *driver* de LED ou uma caixa de som compacta, podem ser colocados em uma plataforma giratória leve, fixada por uma haste ao eixo da mesa, com ajuste de altura se necessário. Por outro lado, equipamentos mais pesados, como um inversor fotovoltaico ou um *simulador de cabeça e tronco*, demandam uma estrutura de sustentação mais robusta.

B. Projeto e desenvolvimento do sistema de controle

O sistema de controle desempenha o papel crucial de interpretar comandos vindos do computador e de convertê-los em instruções para a rotação do eixo do motor. Para facilitar a compreensão do processo de desenvolvimento desse componente, esta seção é subdividida.

1) *Hardware e firmware*: No âmbito do sistema de controle, este projeto utiliza um microcontrolador ATmega328P, que faz parte de um kit de desenvolvimento Arduino Uno [9], [10]. A escolha desse kit é justificada pela sua facilidade de uso e versatilidade. Ele suporta programação em diversas linguagens, como C, C++, Arduino Code, Matlab e Python. Notavelmente acessível no mercado brasileiro, o kit também se destaca pelo seu custo reduzido. Ademais, o *firmware*² pode ser desenvolvido por meio de plataformas como Arduino IDE e Visual Studio. A comunicação entre o computador e o microcontrolador ocorre via comunicação serial, utilizando a porta USB.

No contexto educacional, esta fase é particularmente relevante. Professores podem usá-la para explorar testes de *software*, analisando as capacidades e nuances das diferentes linguagens. Adicionalmente, práticas experimentais relacionadas ao *hardware* poderiam ser conduzidas, focando em aspectos como variações de ângulo (ou passo) e velocidade de rotação do motor, bem como na rotação específica e parada em um ângulo determinado.

2) *Comunicação*: A comunicação serial é um método de transferência de dados em que os bits são enviados sequencialmente por meio de um único canal de comunicação. Ela envolve a transmissão de dados em série, bit a bit, ao longo de um fio de conexão [11]. Existem diferentes protocolos de comunicação serial, como RS-232, UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) e via USB (*Universal Serial Bus*, usado neste projeto), cada um com suas características e especificações.

3) *Driver para o motor de passo e alimentação*: Para o acionamento de um motor de passo, é fundamental a utilização de um *driver* encarregado de energizar e comandar o motor, intermediando a alimentação elétrica e as instruções provenientes do *software*. Com base na corrente máxima estimada de 3 A, identificou-se o modelo TB6600 como o *driver* apropriado para esta aplicação, conforme detalhado em sua *folha de dados* (*datasheet*) [12].

Ao empregar o TB6600, proporciona-se aos estudantes a oportunidade de explorar diferentes modos de acionamento do motor. Durante o desenvolvimento de uma mesa giratória em contexto educacional, é importante que os estudantes compreendam as fundamentações subjacentes à necessidade de um *driver* no controle do motor de passo e como efetuar tal controle.

O acionamento do motor em modo *passo completo* de 1,8° (*full step*) configura-se por executar um passo integral por ativação, energizando os dois enrolamentos do motor (para o NEMA 23). Embora esse modo de operação ofereça o torque mais elevado em comparação com os demais, pode ocasionar vibrações e apresentar uma resolução angular reduzida.

²O *firmware* é o *software* que opera diretamente (de forma embarcada) no *hardware*.

Outra modalidade operacional é o *meio passo* (*half step*). Nessa configuração, o motor progride em meio passo, alterando a energização dos enrolamentos para gerar uma sequência de movimentos intermediários. Essa abordagem proporciona resolução angular ampliada, embora possa apresentar um torque ligeiramente reduzido em comparação ao modo de passo completo.

Há ainda a opção do modo de *micropasso* (*microstep*). Esse método subdivide cada passo completo em incrementos menores, conferindo uma resolução angular superior. O *driver* TB6600 permite diferentes configurações de micropasso, como 1/4, 1/8, 1/16, ou até 1/32 de um passo, dependendo da conjugação de especificações entre o *driver* e o motor empregados. Contudo, é pertinente enfatizar que, ao se aumentar a subdivisão do passo, há uma conseqüente diminuição do torque disponível.

Cada modalidade operacional apresenta suas respectivas vantagens e restrições. A seleção adequada é determinada pelos requisitos e demandas inerentes à aplicação da mesa giratória, considerando, por exemplo, o peso do objeto em teste e a precisão desejada nos resultados. Ainda, em contextos acadêmicos de eletrônica mais avançada, seria possível trabalhar também com o próprio desenvolvimento de um *driver* para o controle do motor de passo, como elaborado por Scherz e Monk [13].

Neste estudo, empregam-se o *driver* TB6600, o microcontrolador Arduino Uno e um motor NEMA 23. Para garantir a alimentação adequada a todos esses componentes, utiliza-se uma fonte chaveada *full-range* de 24 V, com capacidade de fornecer até 6,2 A, conforme suas especificações [14].

4) *Montagem do sistema de controle*: A fase subsequente envolve a montagem do sistema de controle que interliga o computador à mesa giratória. O diagrama de conexões está mostrado na Figura 2, bem como o esquema das ligações elétricas adotado para o sistema completo é retratado na Figura 3.

O projeto do sistema abrange uma fonte de alimentação, um microcontrolador, um *driver* (destinado ao controle do motor de passo) e um conector *Mike* macho de 8 vias. Dentro do *case* montado, conforme ilustrado na Figura 4 (a), é possível observar a fonte de alimentação conectada ao conector do cabo de força. O *driver*, com seu dissipador de calor voltado para cima, se conecta diretamente ao conector *Mike*. Abaixo do *driver* encontra-se o microcontrolador, enquanto os capacitores e resistores do filtro (*RC*) permanecem ocultos à visão. A representação completa do sistema pode ser vista na Figura 4 (b), com dimensões de 30 cm × 15 cm e 10 cm de altura.

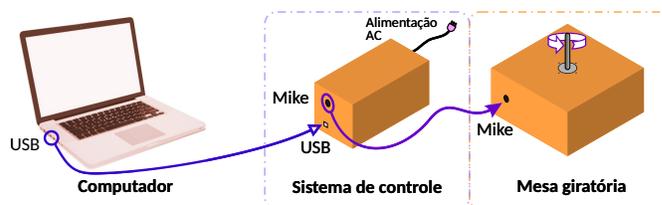


Figura 2: Diagrama de conexões da mesa giratória.

5) *Redução do ruído acústico do motor*: Durante os testes experimentais iniciais, observou-se que o motor de passo, ao operar com o TB6600, produz um ruído acústico (em todos os modos de operação) decorrente da estratégia de modulação empregada pelo circuito de acionamento durante a execução

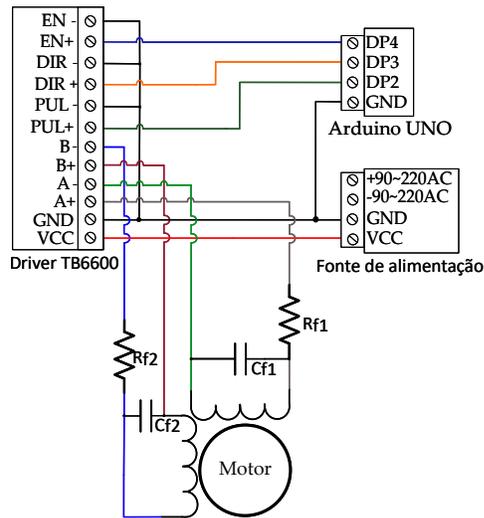


Figura 3: Esquema elétrico (simplificado) do sistema de controle da mesa giratória integrando driver TB6600, fonte de alimentação, Arduino Uno, dois filtros passa-baixas RC e o motor de passo NEMA 23.



(a) Interior do sistema de controle.



(b) Sistema de controle fechado.

Figura 4: Sistema de controle para mesa giratória.

dos passos. Embora acredite-se que a elaboração de um *driver* específico e modificações no *firmware* possam remediar essa questão, neste estudo, priorizou-se uma abordagem elétrica: a implementação de um filtro passa-baixas de configuração³ RC em série com o motor. Tal medida visa à diminuição do ruído mecânico (gerado por vibração do eixo), haja vista sua origem elétrica.

³Circuito de filtro que integra um resistor (R) em série e um capacitor (C) em paralelo.

De acordo com as *folhas de dados* do TB6600 e do motor NEMA 23 adotados, a frequência de modulação dos micropassos situa-se aproximadamente em 50 kHz, enquanto a indutância e resistência do motor são estimadas em 7,5 mH e 2 Ω , respectivamente. Por meio de análises empíricas, identificou-se que a integração de um resistor de filtro $R_f = 1 \Omega$ e um capacitor cerâmico $C_f = 10 \mu\text{F}$ resulta na atenuação adequada do ruído acústico. Portanto, foram aplicados dois filtros conforme essa configuração. A conexão destes componentes pode ser visualizada na Figura 3. Importa salientar que esse filtro ocasiona uma dissipação térmica notável, fator que deve ser ponderado ao selecionar os resistores — neste projeto foram utilizados resistores de 20 W e capacitores para 100 V.

No aspecto educacional de *controle de ruído*, o docente poderia trabalhar tanto questões de projetos de filtros (nos contextos elétrico e acústico) quanto análise espectral, dada a redução em ruído audível promovida.

6) *Considerações sobre o sistema de controle*: O sistema desenvolvido incorpora componentes de fácil aquisição no mercado, resultando em um custo total aproximado de R\$ 700, ao se contabilizar todos os elementos envolvidos. Este valor é significativamente mais acessível se comparado ao custo de uma mesa giratória comercial, frequentemente orçada em dezenas de milhares de reais. Ressalta-se que o motor de passo, detentor do maior impacto orçamentário neste projeto, juntamente com outros componentes, pode ser recuperado de equipamentos obsoletos. Assim, a economia ao optar por esta solução em detrimento de opções comerciais torna-se ainda mais evidente.

Com o sistema de controle e mesa giratória estabelecidos, e ao adicionar-se microfones e uma placa de áudio, é possível efetuar medições acústicas para caracterizar a direcionalidade fontes sonoras, conforme mencionado anteriormente. Ademais, em ambiente educacional, a adaptabilidade do sistema destaca-se, permitindo que os alunos se aprofundem em temas como processamento digital de sinais, programação de microcontroladores, mecanismos de controle e acionamento de motores de passo, protocolos de comunicação serial e análise de dados, entre outros tópicos relevantes.

III. APLICAÇÕES MULTIDISCIPLINARES COM A MESA GIRATÓRIA DESENVOLVIDA

Nesta seção, exploram-se variadas aplicações multidisciplinares que podem ser proporcionadas pela mesa giratória desenvolvida. Detalhes adicionais sobre resultados elétricos e acústicos serão contemplados em uma publicação conseguinte.

No contexto educacional, o emprego da mesa giratória com integração ao Matlab e Python abre um vasto espectro de oportunidades e vantagens. Essa interconexão pode ser mobilizada em variadas disciplinas de forma integrativa, abrangendo áreas como Processamento Digital de Sinais, *Design* de Caixas Acústicas, Auralização, Programação, Eletrônica, Eletrônica de Potência e Mecânica, para citar alguns exemplos. Esse leque diversificado reforça a versatilidade da mesa giratória em múltiplos cenários pedagógicos.

Ao introduzir a mesa giratória nas disciplinas supracitadas, os alunos são incentivados a transpor os conceitos teóricos absorvidos em sala para um cenário prático e controlado.

A habilidade da mesa giratória de comunicar-se com o computador via serial e responder a comandos oriundos de *software* possibilita uma experiência educacional dinâmica e interativa. Essa abordagem estimula uma compreensão mais refinada dos conceitos físicos subjacentes, ao mesmo tempo que aprimora competências práticas fundamentais para profissionais nas áreas de Engenharia Elétrica e Acústica.

A primeira aplicação explorada nesta seção aborda medições acústicas com o intuito de investigar a resposta direcional de alto-falantes [15]. Tal conteúdo poderia ser integrado a disciplinas como Caixas Acústicas ou Processamento Digital de Sinais (PDS), especialmente no curso de Engenharia Acústica. Adicionalmente, ainda em acústica, uma mesa giratória desempenha um papel fundamental na análise e caracterização de diversos parâmetros, como em métodos de aquisição do *coeficiente de espalhamento* de dispositivos voltados à acústica de salas [16].

A segunda aplicação delineada também utiliza medições acústicas, todavia, propõe-se à análise do ruído acústico de conversores eletrônicos — estabelecendo a ponte entre as áreas de elétrica e acústica. Essa vertente poderia ser assimilada tanto em disciplinas de Eletrônica, Eletrônica de Potência quanto em Processamento de Sinais no âmbito da Engenharia Elétrica.

A terceira aplicação coloca em voga o emprego da mesa giratória no âmbito da acústica espacial tridimensional (3D), acústica virtual e auralização. Neste contexto de medição, é viável obter o conjunto de funções de transferência relacionadas à audição.

A. Direcionalidade de fontes acústicas

Nas disciplinas supramencionadas, uma faceta valiosa do aprendizado envolve o estudo da direcionalidade sonora. Esse conceito refere-se à distribuição espacial do som, variando com a frequência, proveniente de uma fonte sonora específica [17]. A exata caracterização e entendimento da direcionalidade sonora são primordiais para diversas aplicações, englobando, mas não se limitando, ao projeto de sistemas de som, à acústica arquitetônica e à análise de fontes de ruído.

A Figura 5 apresenta a medição da direcionalidade sonora em diferentes frequências para um alto-falante específico [18]. Durante o procedimento de medição, o alto-falante é centralizado no eixo da mesa giratória, enquanto, em campo sonoro livre, posiciona-se um microfone. Em cada incremento de rotação, o alto-falante emite um sinal sonoro com uma varredura exponencial de frequências. Após a coleta de todos os dados ao longo de uma rotação completa, a matriz de resultados é sintetizada, culminando na construção de um gráfico polar.

Para efetuar as medições de direcionalidade sonora, discentes são incentivados a criar códigos utilizando o Matlab, por exemplo. Por meio desse *software*, é possível instruir a mesa giratória a rotacionar em incrementos precisos e exatos de, por exemplo, $0,9^\circ$. Simultaneamente, o sistema de aquisição e geração de sinais registra a resposta em frequência associada a cada ângulo específico.

B. Ruído acústico de conversores eletrônicos

Conversores eletrônicos, em sua operação, podem se tornar fontes de ruído acústico [20], como efeito secundário indesejado. Embora exista uma padronização que define os limites

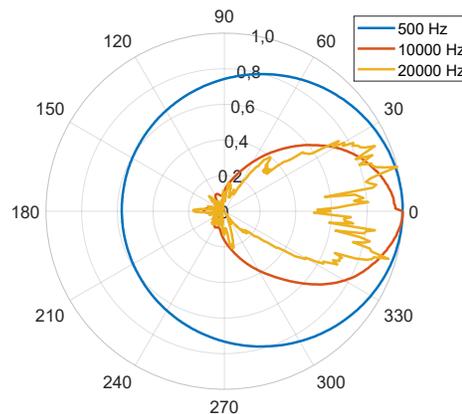


Figura 5: Direcionalidade sonora em diferentes frequências (pressão sonora normalizada e em dB) de uma caixa de som portátil JBL Clip 2 — retirado de Viera [18].

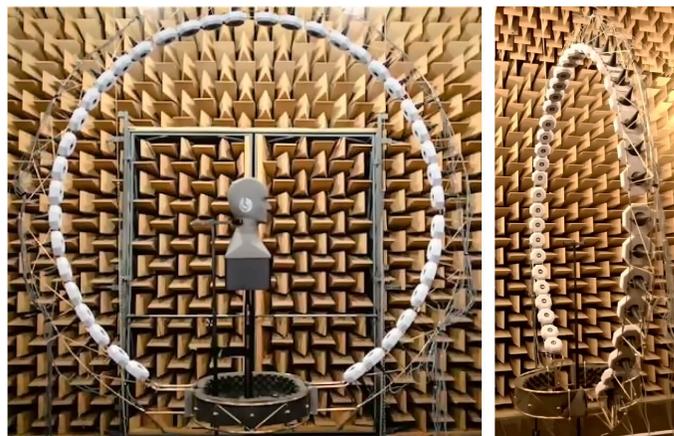


Figura 6: Sistema de medição de Funções de Transferência Relacionadas à Cabeça (HRTF) — retirado de Pollow [19].

para o ruído eletromagnético [21], o ruído acústico gerado pode manifestar-se em um vasto espectro de frequências audíveis, sendo ele fortemente influenciado pela concepção do conversor. Para efetivamente mitigar essa forma de poluição sonora, é primordial que sua caracterização seja abrangente, abordando não somente seu espectro, mas também sua direcionalidade sonora, seja em uma abordagem 2D ou 3D.

Dentro desse contexto, a utilização de uma mesa giratória assume uma relevância singular. Ela permite uma avaliação exata da direcionalidade sonora, promovendo a rotação automatizada dos sistemas eletrônicos ao longo das medições, que abrangem tanto parâmetros acústicos quanto elétricos (de forma simultânea). Dessa forma, é viável identificar especificamente quais componentes eletrônicos atuam como proeminentes emissários de ruído sonoro.

Particularmente para sistemas que geram ruídos acústicos em frequências elevadas — aproximando-se da fronteira dos 20 kHz, que demarca o limite superior da audição humana — torna-se imperativo que o incremento angular da rotação seja excepcionalmente refinado. Isso se justifica pelo fato de que fontes sonoras de alta frequência têm um feixe estreito de radiação. Portanto, diante do exposto, a mesa giratória desenvolvida emerge como uma ferramenta importante para tais investigações, dada sua habilidade de operar com precisão angular notável, alcançando rotações com ângulos tão sutis quanto $0,125^\circ$.

A disciplina de Auralização, por sua vez, oferece aos alunos a oportunidade de aprender e aplicar técnicas avançadas para criar uma experiência auditiva imersiva. A partir do uso da mesa giratória, em conjunto com ferramentas de programação, os alunos podem desenvolver programas que permitem controlar a direção (azimute) de cabeças artificiais, com o objetivo de obter o seu respectivo conjunto HRTFs⁴ (do inglês *Head-Related Transfer Function*) [6]. Um exemplo de sistema de medição de HRTF é ilustrado na Figura 6, observe mesa giratória na parte inferior das fotos.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho destacou a criação de uma mesa giratória como instrumento de significativo valor tanto prático quanto pedagógico, fortalecendo a aprendizagem multidisciplinar. A proposta apresentada não apenas facilita a transição dos alunos da teoria à prática, mas também fomenta uma abordagem interativa ao currículo. O projeto da mesa incorpora componentes de fácil aquisição — motor de passo, microcontrolador e um controlador de velocidade —, culminando em um sistema custo-efetivo com notável exatidão.

A relevância da mesa giratória para o ensino de Engenharia, especialmente na Acústica e Elétrica, foi delineada devido à sua intrínseca relação com os tópicos dessas áreas. Sua compatibilidade com *software* renomados, como Matlab e Python, a eleva a uma plataforma versátil, enriquecendo o ensino em disciplinas como Processamento Digital de Sinais, Caixas Acústicas, Auralização, Programação, Eletrônica e Eletrônica de Potência, apenas para citar algumas.

O processo de concepção da mesa pode, por si só, ser incorporado como uma metodologia ativa no ensino de programação de microcontroladores, centrado no controle de motores de passo e protocolos de comunicação. Assim, criando conexões com as Engenharias Elétrica e de *software*.

Em síntese, o projeto da mesa giratória se consolida como um recurso didático valioso, fomentando a aplicação prática da teoria e instigando habilidades cruciais nas esferas elétrica e acústica. Ela não somente concebe novas fronteiras experimentais, como também potencializa uma compreensão mais acurada dos conceitos acadêmicos apresentados.

AGRADECIMENTOS

Este estudo contou com o suporte da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior — Brasil (CAPES/PROEX) — Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), sob o processo 308653/2022-0. Ademais, os autores gostariam de agradecer o apoio e infraestrutura da Engenharia Acústica (EAC), do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) e do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo (PPGAUP), todos vinculados à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

⁴Também encontrada como Funções de Transferência Relacionadas à Cabeça, são funções de transferência que caracterizam a audição espacial de seres humanos (com suas duas orelhas receptoras).

- [1] L. R. C. Ribeiro, *Aprendizagem baseada em problemas (PBL): uma experiência no ensino superior*. São Carlos, SP: EdUFSCar, 2008. ISBN 978-8576001140
- [2] A. P. de Lacerda, “O ruído e seus efeitos nocivos sobre o organismo humano,” *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, vol. 37, no. 3, pp. 281–288, 1971. ISSN 1808-8694, 1808-8686. [Online]. Disponível em: <http://oldfiles.bjorl.org/conteudo/acervo/acervo.asp?id=1021>
- [3] P. C. F. Machado, M. J. do Carmo, Ângelo Rocha Oliveira, e A. L. de Faria, “Educação em eletrônica de potência: a problemática entre teoria e prática e a carência de recursos laboratoriais,” in *XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*, Blumenal, SC, outubro 2011, pp. 1–8. [Online]. Disponível em: <http://www.abenge.org.br/cobenge/legado/arquivos/8/sexoestec/art1964.pdf>
- [4] Z. Wei-jun, Y. Guang-dong, L. Heng-bo, W. Zhong-zhou, e S. Hai-xuan, “Design and analysis of large-size precision turntable shafting for phase contrast ct imaging,” *Chinese Journal of Engineering Design*, vol. 25, no. 2, pp. 223–229, 2018. doi: 10.3785/j.issn.1006-754X.2018.02.014.
- [5] EcoSolys, “Inversor Fotovoltaico on-grid ecoSolys,” folha de dados, 2020. [Online]. Disponível em: https://ecosolys.com.br/gerenciador/data/uploads/2021/06/manual-de-instalao_v2.0_ecos_site_reg-inmetro-2020.pdf
- [6] W. D’A. Fonseca, D. R. Carvalho, e F. R. de Mello, “Binaural Parameters: código computacional para ensino da tecnologia binauricular,” in *XXX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica (Sobrac 2023)*. Natal, RN, Brasil: Sociedade Brasileira de Acústica, novembro 2023, pp. 1–16. [Online]. Disponível em: <https://bit.ly/sobrac2023-binaural>
- [7] Brüel & Kjær, “Head-and-Torso Simulator (HATS).” [Online]. Disponível em: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp0521.ashx>
- [8] Fortek, “(Motor de Passo) 1.8° 57mm Hybrid Stepper Motor-NEMA 23,” folha de dados (*datasheet*). [Online]. Disponível em: <https://datasheets.electrogon.com/HTB13H32HFXXXXaEXFXX.PRXXFXXXX4.pdf>
- [9] Atmel, “Microcontroller ATmega328P,” folha de dados (*datasheet*). [Online]. Disponível em: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
- [10] Arduino, “Arduino Uno R3,” folha de dados (*datasheet*). [Online]. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>
- [11] J. Axelson, *Serial Port Complete: COM Ports, USB Virtual COM Ports, and Ports for Embedded Systems (Complete Guides series)*, 2nd ed. Lakeview Research, 2007. ISBN 978-1931448062
- [12] Toshiba, “TB6600HG – PWM Chopper-Type bipolar (Stepping Motor Driver IC),” folha de dados (*datasheet*). [Online]. Disponível em: <https://www.mouser.com/datasheet/2/408/TB6600HG-483084.pdf>
- [13] P. Scherz e S. Monk, *Practical Electronics for Inventors*, 4th ed. McGraw-Hill Education TAB, 2016. ISBN 978-1259587542
- [14] ZX, “Fonte de Alimentação Chaveada S (MS-150-24),” folha de dados (*datasheet*). [Online]. Disponível em: <https://www.bhseletronica.com.br/pdf/catalogo-geral-fonte-chaveada-s-rev-nov-18.pdf>
- [15] A. M. Pasqual, “Controle da diretividade sonora no espaço tridimensional por um arranjo esférico compacto de alto-falantes,” Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, jul. 2018. [Online]. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1612459>
- [16] T. Kamisiński, J. Rubacha, e A. Pilch, “The study of sound scattering structures for the purposes of room acoustic enhancement,” *Acta Physica Polonica Series a*, vol. 118, pp. 83–86, 07 2010. ISSN 1898-794X, 0587-4246. doi: 10.12693/APhysPolA.118.83.
- [17] L. L. Beranek e T. J. Mellow, *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Academic Press, out. 2012. ISBN 978-0123914217
- [18] E. M. Viera, “Desenvolvimento de câmara anecoica para medição de direcionalidade sonora de um conversor eletrônico,” Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Acústica (EAC), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil, setembro 2021.
- [19] M. Pollow, “Directivity patterns for room acoustical measurements and simulations,” Tese de doutorado, Institute of Technical Acoustics, RWTH Aachen University, Aachen, Alemanha. ISBN 978-3832540906 Sep. 2015. [Online]. Disponível em: <https://publications.rwth-aachen.de/record/483805>
- [20] L. Huber e M. M. Jovanović, “Methods of reducing audible noise caused by magnetic components in variable-frequency-controlled switch-mode converters,” in *2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. IEEE, March 2011. doi: 10.1109/APEC.2011.5744580. pp. 83–90.
- [21] F. Beltrame, L. Roggia, L. Schuch, e J. R. Pinheiro, “EMI conduzida gerada por conversores estáticos aplicados à correção do fator de potência,” *Sba: Controle & Automação*, vol. 23, no. 1, pp. 1–13, Jan 2012. ISSN 0103-1759. doi: 10.1590/S0103-17592012000100001.