

UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL  
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA  
Curso de Engenharia Elétrica

DESENVOLVIMENTO DE UM ALTO-FALANTE UTILIZANDO IMÃ DE  
NEODÍMIO

GUSTAVO PIGATTO BOHN

Canoas, Novembro 2005.

Gustavo Pigatto Bohn

Matrícula 981101994-0

Desenvolvimento de um alto-falante utilizando ímã de Neodímio

Trabalho de conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista; Universidade Luterana do Brasil; Curso de Engenharia Elétrica.

Orientadora: Marília Amaral da Silveira

Nome: Gustavo Pigatto Bohn Matrícula: 981101994-0

## Desenvolvimento de um alto-falante utilizando imã de Neodímio

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. ME. Dalton Vidor

---

Prof. ME. Carla Diniz Lopes

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em: 02/12/2005

“ Navegamos em um mar de conhecimento;  
quanto mais nadamos;  
mais vislumbramos que este mar não tem fim; “

Autor desconhecido

A professora Marília Amaral da Silveira,  
por ter me incentivado a fazer este trabalho  
Ao meu amigo e mestre Paulo José Teche (in memorium)  
Em especial a minha mãe,  
Rosmarina Pigatto Bohn (in memorium)

## AGRADECIMENTOS

A professora Marília Amaral da Silveira, pela sua dedicação e perfeita orientação para este trabalho, onde sem a sua visão não teria conseguido chegar ao fim deste trabalho.

Ao Professor e mestre Homero Sette Silva, que me auxiliou através de seus magníficos trabalhos sobre alto-falantes e caixas acústicas.

Ao mestre Carlos Correa da Silva, por seu vasto conhecimento sobre a história dos transdutores acústicos.

Aos meus colegas de faculdade, que sem eles, o caminho da graduação teria sido muito mais sofrido, em especial aos colegas de grupos de estudo.

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica da Ulbra, de alguma forma ajudaram a obter o conhecimento e o caráter profissional.

À Eletrônica Selenium S.A., que me proveu de recursos para chegar a este trabalho.

## Sumário

Resumo .....	12
Abstract .....	13
1. Introdução .....	14
1.2 Justificativa e objetivos.....	14
1.3 Contribuições deste trabalho.....	14
2. O Alto-Falante .....	16
2.1 História do Alto-Falante .....	16
2.2 História do Magnetismo.....	17
2.3 Alto-falante do tipo driver de compressão .....	21
3.Principais conceitos do magnetismo .....	23
4.Modelo analítico do Alto-Falante .....	27
4.1 Estudo de campos magnéticos aplicado ao alto-falante .....	28
4.2 Campo magnético produzido pelo imã permanente .....	28
4.3 A equação de Laplace em Termos do Potencial Escalar Magnético .....	29
4.4 Definindo o ponto de operação do imã.....	37
5.O Método de Elementos Finitos .....	42
5.1 Flux2D.....	43
6.Simulação do circuito magnético de Neodímio-Ferro-Boro .....	45
6.1 Pré-processamento .....	45
6.1.1 Geometria .....	45
6.1.2 Definição das regiões.....	46
6.1.3 Definição dos pontos da malha .....	48
6.1.4 Geração da malha.....	50
6.2 Processamento .....	52
6.2.1 Resolução da matriz.....	52
6.3 Pós-processamento .....	53
6.3.1 Curva da densidade de fluxo.....	53
6.3.2 Linhas de fluxo .....	55
6.3.3 Mapa de cores .....	56
7.Protótipo baseado na simulação por elementos finitos .....	58
8.Protótipo montado.....	59
9.Resultados dos testes .....	60
9.1 Medição da densidade de fluxo magnético no entreferro.....	60
9.2 Medição da curva de resposta em frequência.....	62
Conclusão .....	63
Bibliografia .....	64
Anexos .....	65

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Driver W555 e corneta utilizada na época de sua idealização .....	17
Figura 2 - Alto-falante do tipo driver de compressão .....	21
Figura 3 - Circuito magnético com imã permanente .....	23
Figura 4 - Característica de segundo quadrante de um imã permanente e sua reta de carga .....	25
Figura 5 - Vista em corte da geometria em estudo .....	31
Figura 6 - Detalhe A, região do circuito magnético onde serão focados os cálculos.	32
Figura 7 - Região do entreferro com os potenciais magnéticos indicados .....	32
Figura 8 - Gráfico representando a linha potencial de uma das paredes do entreferro .....	32
Figura 9 - Gráfico representando a linha potencial de uma das paredes do entreferro .....	35
Figura 10 - Curva característica de segundo quadrante de um imã permanente de Neodímio-Ferro-Boro e sua reta de carga.....	39
Figura 11 - Gráfico analítico representando a densidade de fluxo no entreferro.....	41
Figura 12 – Geometria no simulador com os vértices e linhas definidos.....	45
Figura 13 - Geométrica no simulador com as regiões definidas e delimitadas .....	46
Figura 14 – Geometria no simulador com as fronteiras de entreferros definidas .....	47
Figura 15 - Subdivisão das linhas para a geração dos vértices da malha.....	48
Figura 16 - Detalhe da subdivisão das linhas para a geração dos vértices da malha .....	49
Figura 17 - Malha gerada pelo Flux2D .....	50
Figura 18 - Detalhe da malha no circuito que está sendo simulado .....	51
Figura 19 – da densidade de fluxo na região do entreferro .....	53
Figura 20 – Curva da densidade de fluxo na região onde está localizada a bobina..	54

Figura 21 – Linhas de campo percorrendo a geometria .....	55
Figura 22 - Mapa de cores e linhas de campo sobrepostas do circuito magnético ...	56
Figura 23 - Mapa de cores e linhas de campo sobrepostas do circuito magnético ...	57
Figura 24 - Desenho em corte do protótipo a ser montado .....	58
Figura 25 - Foto do protótipo montado .....	59
Figura 26 - Aparato montado para medição da densidade de fluxo magnético no entreferro.....	60
Figura 27 - Gráfico da distribuição da densidade magnética medida no entreferro ..	61
Figura 28 - Curva de resposta em frequência do protótipo versus o atual .....	62



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resolução da matriz pelo método de Newton Raphson.....	52
Tabela 2 – Valores de densidade de fluxo na posição da bobina .....	54
Tabela 3 - Densidades de fluxo medidas e calculadas .....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- $A_1$  - Condição de contorno para o eixo  $x$ .
- $B_1$  - Condição de contorno para o eixo  $y$ .
- $B_g$  - Vetor densidade de fluxo magnético no entreferro [T]
- $B_m$  - Densidade de fluxo no ímã permanente [T]
- $\vec{B}_r$  - Vetor densidade de fluxo remanente ou remanência [T]
- $b_n$  - Coeficiente da série de Fourier
- $C_e$  - Coeficiente de espraçamento do fluxo magnético no entreferro
- $\vec{H}$  - Vetor intensidade de campo magnético [A/m]
- $H_c$  - Força coercitiva [A/m]
- $H_{Fe}$  - Intensidade de campo magnético no ferro [A/m]
- $H_g$  - Intensidade de campo magnético no entreferro [A/m]
- $H_m$  - Intensidade de campo magnético do ímã permanente [A/m]
- $I$  - Corrente elétrica [A]
- $\vec{l}$  - Vetor cujo módulo é o comprimento ativo do condutor [m]
- $l_d$  - Grandeza definida pelo comprimento em  $x$  do modelo em estudo onde o potencial magnético é nulo [m]
- $l_{Fe}$  - Comprimento em  $x$  total do entreferro [m]
- $l_g$  - Comprimento em  $y$  do entreferro [m]
- $l_m$  - Comprimento axial do ímã permanente [m]
- $l_t$  - Grandeza definida pelo comprimento total em  $x$ , do modelo em estudo [m]

$N$  - Número de espiras de um enrolamento

$\phi_m$  - Fluxo magnético produzido pelo ímã permanente [Wb]

$\phi_g$  - Fluxo magnético no entreferro [Wb]

$S_g$  - Área da superfície transversal ao fluxo magnético no entreferro [m<sup>2</sup>]

$S_m$  - Área da superfície polar do ímã permanente [m<sup>2</sup>]

$\alpha$  - Variável definida por  $j \frac{\pi \cdot n}{l_t}$  [rd/m]

$\beta$  - Variável definida por  $\frac{\pi \cdot n}{l_t}$  [rd/m]

$\psi$  - Potencial escalar magnético [A]

$\theta$  - Ângulo da identidade de Euler

$\mu_0$  - Permeabilidade magnética do vácuo [H/m]

$\nabla$  - Operador nãbla, que em coordenadas retangulares é igual a

$$\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$$

## Resumo

Este trabalho apresenta o estudo de um alto-falante que emprega um ímã permanente de Neodímio-Ferro-Boro, em substituição aos ímãs permanentes de ferrite de bário e de ferrite de estrôncio. Atualmente, há uma tendência mundial de produzir alto-falantes de maior potência e menor volume. Alto-falantes de maior potência possuem bobinas constituídas de condutores de maior bitola. Conseqüentemente, o comprimento do entreferro de tais dispositivos é maior. Assim, a eficiência dos alto-falantes é reduzida, em função da diminuição da densidade de fluxo magnético no entreferro. Uma solução comumente utilizada é aumentar o ímã permanente, para compensar o efeito de um longo entreferro. Desta forma, o volume do conjunto magnético torna-se bastante grande. Outra alternativa mais vantajosa, é o emprego de ímãs permanentes de elevado produto energético, tais como Neodímio-Ferro-Boro. Estes ímãs permanentes possuem um produto energético 3,9 vezes maior do que os ímãs permanentes de ferrite. O emprego de tais ímãs permanentes permite que se obtenha alto-falantes de maior eficiência e de menor volume do conjunto magnético. Neste trabalho será apresentado um projeto de um alto-falante de média e alta frequência (driver de compressão) com ímã permanente de Neodímio-Ferro-Boro. São apresentados os resultados do estudo analítico da distribuição de densidade de fluxo magnético no entreferro, das simulações numéricas, empregando o método dos elementos finitos e dos testes realizados com o protótipo construído. Os testes mostraram que o valor da densidade de fluxo magnético medido no entreferro do dispositivo tem um valor médio de 1,71 T. Os resultados obtidos através da análise numérica e do modelo analítico mostraram-se bastante próximos dos valores medidos.

## Abstract

This work presents the study of a loudspeaker (compression driver) that uses a Neodymium-Iron-Boron permanent magnet, in substitution to the more usual barium ferrite and strontium ferrite permanent magnets. Nowadays the world industry is moving towards the production of high power, smaller and lightweight speakers. High power loudspeakers are made with voice coils assembled with large wire gage. Consequently, the gap width in such devices is large. For this reason the loudspeakers efficiency reduces, since the magnetic flux density in gap decreases. A solution commonly used consists in the increase of the permanent magnet, to compensate the effect of a wide gap. This way, the volume of the magnetic assembly becomes quite big. Another approach is to use a high energy product permanent magnets, such as Neodymium-Iron-Boron. These permanent magnetic material has 3,9 times more energy than the common ferrite magnets. The application of such new material allows to obtain transducers with high efficiency and small volume magnetic assembly. The present study will show the project of a transducer, specialized in the reproduction of mid and high frequency bands, called compression driver, using a Neodymium-Iron-Boron permanent magnet. From the analytical study results of the magnetic density flux distribution present in the gap. The numeric simulations were made by means of the method of finite elements and the tests in a prototype assembled. The magnetic flux density measured in the gap is a medium 1,71 T. The results obtained from the numeric analysis were in close agreement with the measured values.

## 1. Introdução

Este trabalho apresenta um estudo de um alto-falante do tipo driver de compressão que emprega imã permanente de Neodímio-Ferro-Boro.

Este estudo contempla o projeto do dispositivo, simulação numérica por elementos finitos, o modelo analítico que descreve o comportamento da distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro e os testes.

### 1.2 Justificativa e objetivos

Este trabalho teve por objetivo principal construir um driver de menor volume através do emprego de imãs permanentes de alto valor energético, como fonte de excitação do campo. Como partes do estudo do novo driver, foi feito a simulação do comportamento magnético do conjunto magnético do driver, o desenvolvimento de um modelo analítico para descrever o comportamento da distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro, testes para comprovação dos valores da densidade de fluxo no entreferro e teste acústico comparativo entre o driver fabricado normalmente e o proposto utilizando Neodímio-Ferro-Boro.

### 1.3 Contribuições deste trabalho

Em um sistema de trio elétrico os alto-falantes chegam a representar de 10% a 20% do peso total do sistema de som, o que pode chegar a 10 toneladas em alguns sistemas. Este peso todo se torna muito oneroso quando o trio elétrico precisa viajar, pois o sistema de suspensão e pneus são os que acabam se danificando, segundo os construtores de trio elétrico, este vem a ser um dos principais problemas de se trabalhar com sistemas de grande porte.

Se conseguirmos reduzir o peso dos alto-falantes sem depreciarmos a eficiência haverá uma forte contribuição para os projetos de sistemas de som de grande porte.

Utilizando o imã de Neodímio-Ferro-Boro consegue-se alcançar estes objetivos, é o que este trabalho irá apresentar. Iremos comprovar analiticamente e

por simulação utilizando software de elementos finitos e sendo validado por protótipo funcional. Este trabalho está organizado em 9 capítulos.

No capítulo 2 apresenta uma visão geral do alto-falante através da história do alto-falante, história do magnetismo e demonstrando a constituição de um alto-falante e suas partes.

No capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre conceitos de magnetismo, que são base para o desenvolvimento analítico.

No capítulo 4 demonstra-se o modelo analítico através do estudo de campos magnéticos aplicado ao alto-falante, campo magnético produzido pelo ímã permanente, utilização da equação de Laplace em termos do potencial escalar magnético e chegando à definição do ponto de operação do ímã.

No capítulo 5 apresenta um embasamento sobre o método de elementos finitos, demonstrando as equações utilizadas no software Flux2D.

No capítulo 6 apresenta o desenvolvimento da simulação no Flux2D, apresentando o pré-processamento, processamento e pós-processamento.

No capítulo 7 apresenta-se o projeto do protótipo seguindo as confirmações das dimensões provenientes dos cálculos analíticos e do método numérico.

No capítulo 8 mostra-se o protótipo montado e que será testado para comprovação.

No capítulo 9 é feita a medição da densidade de fluxo magnético no entreferro e medido a resposta em frequência do driver montado.

## 2. O Alto-Falante

### 2.1 História do Alto-Falante<sup>1</sup>

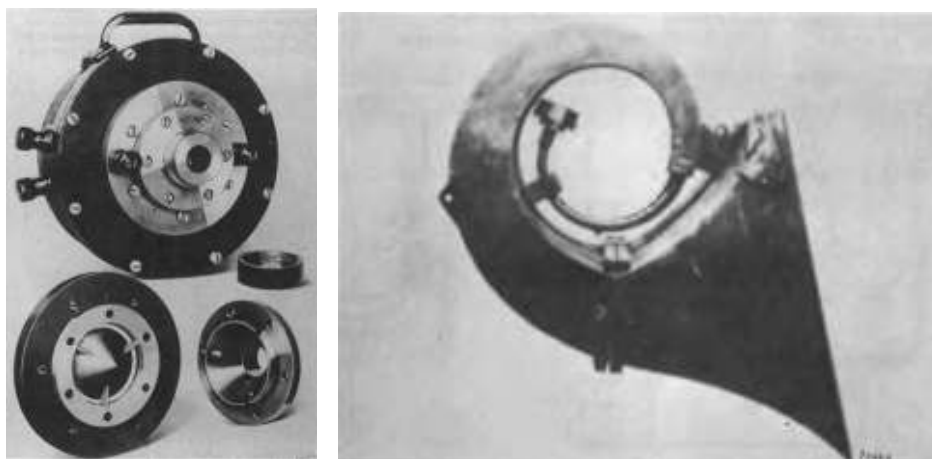
Pode-se dizer que a história do alto-falante é atrelada às cornetas, e estas surgiram nas épocas mais antigas com o uso de chifres de boi, que faziam com que a voz humana atingisse longas distâncias. Hoje podem ser vistas no nosso cotidiano, sendo aplicadas em instrumentos de sopro, em sirenes, buzinas e por fim com alto-falantes e drivers.

A história do alto-falante como conhecemos hoje começa com a concessão da primeira patente, em 14 de Abril de 1874, à E. W. Siemens (fundador da Siemens & Halske, na Alemanha) referente a um dispositivo idêntico ao alto-falante eletrodinâmico (bobina móvel), mas usado como atuador mecânico. (relé), passando pela primeira patente do alto-falante, em 1898, em nome de Sir Oliver Lodge, os princípios básicos deste transdutor mantiveram-se praticamente os mesmos. Mudaram apenas os materiais e os processos de fabricação.

Já na primeira década do século passado se utilizavam amplificadores valvulados de 5W em alto-falantes que eram acoplados a enormes cornetas para poder abranger um público de 800 pessoas. Na década de 20 houve uma crescente necessidade de sonorizar grandes teatros e cinemas, principalmente com o surgimento de grandes companhias de cinemas da época, Com isto a Western Electric desenvolveu através de Edward Wente e Albert L. Thuras o primeiro driver de compressão no formato que conhecemos hoje, o modelo 555W (Figura 1). Este driver era acoplado a uma corneta que possuía Ø1" de garganta e 40 ft<sup>2</sup> de boca (Figura 1), este sistema era capaz de reproduzir uma faixa de frequência de 100Hz a 5000Hz com uma eficiência de 25%, era alimentado através de um amplificador de 10W (modelo 205-D) que na época era o que se conseguia através do uso de válvulas.

<sup>1</sup>Para maiores detalhes ver anexo "Historical review of horns used for audience-type sound reproduction"





**Figura 1 - Driver W555 e corneta utilizada na época de sua idealização**

A partir desta época foram existindo aprimoramentos ao projeto iniciado por Wentz e Thuras, as mudanças aconteceram principalmente em termos de materiais e aprimoramento das geometrias, o que resultou em uma ampliação da faixa de resposta e o aumento da potência.

## 2.2 História do Magnetismo

A história do magnetismo começou com um mineral chamado magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), a primeira substância com propriedades magnéticas conhecida pelo homem. Sua história anterior é obscura, mas seu poder de atrair ferro já era conhecido séculos antes de Cristo. A magnetita está amplamente distribuída. No mundo antigo, os depósitos mais abundantes ocorriam na região chamada Magnésia, localizada no que é hoje a Turquia, e a palavra magneto é derivada de uma similar grega, que se diz ter vindo do nome dessa região.

No século III a.C. adivinhadores chineses da sorte operavam com duas placas, uma sobre a outra. A placa superior representava o céu e girava num pivô colocado sobre a placa inferior, que simbolizava a Terra. Além disso, na placa superior estava representada a constelação da Ursa Maior, que gira, no céu, ao redor do eixo Norte-Sul. O adivinho atirava contra as placas algumas peças de magnetita, que simbolizavam vários objetos, e de suas posições o futuro era

deduzido. Uma das peças simbolizava a constelação da Ursa Maior e tinha a forma de uma colher. Com o tempo, colheres rotativas substituíram toda a placa superior e como essas colheres sempre se orientavam na direção Norte-Sul, os adivinhos se convenceram de que eram verdadeiramente objetos mágicos. Essa é, na verdade, a essência da bússola magnética, que se tornou um objeto familiar já no século I D. C. No século VI, os chineses descobriram que pequenas agulhas de ferro podiam ser magnetizadas caso fossem esfregadas com um pedaço de magnetita. Como a utilização da agulha magnética trouxe maior precisão na observação das direções magnéticas, os chineses também descobriram que o Norte e o Sul magnéticos não coincidiam com o Norte e o Sul geográfico, descoberta que só foi feita no Ocidente após mais de setecentos anos. Ainda mais tarde os chineses perceberam que era possível magnetizar o ferro aquecendo-o ao rubro e deixando-o esfriar estendido na direção Sul-Norte. No século XII, a bússola magnética era comum nos navios chineses. No Ocidente, o seu uso se iniciou pelo menos cem anos depois.

O primeiro a escrever sobre o magnetismo no Ocidente foi Peter Peregrinus, que exercia as funções de engenheiro militar no exército do rei da Sicília, no século XIII. Peregrinus escreveu um tratado datado de 1269 onde, além de descrever a magnetita e suas propriedades, definia a propriedade do ímã de apontar sempre para o Norte, mencionava pela primeira vez o termo pólo magnético e explicava como um ímã, quando partido em dois, se transformava em dois ímãs. O tratado continha, ainda, uma tentativa de aplicar a força magnética para gerar um movimento perpétuo e uma menção da declinação magnética, isto é, do fato de o ímã apontar para o norte magnético e não para o Norte geográfico.

O segundo a escrever sobre esse assunto no Ocidente foi o fabricante de instrumentos inglês Robert Norman, cujo livro apareceu em 1581 contendo um pequeno discurso sobre ímãs e uma descrição da inclinação magnética, isto é, da inclinação da agulha magnética em relação à horizontal, que difere de um lugar para outro. Mas o trabalho mais significativo desse tempo e o mais completo desde o tempo de Peter Peregrinus foi o livro *De Magnete*, publicado em Londres, em 1600, por William Gilbert, na época médico da rainha Elizabeth I. O livro discutia a bússola magnética, o comportamento do ímã propriamente dito, com seus poderes de atração e repulsão, a distinção entre a ação magnética e a ação (elétrica) do âmbar

e o envolvimento de cada imã por uma "órbita invisível de virtude", que afetava qualquer pedaço de ferro que fosse colocado em sua vizinhança. O livro discutia, também, como um imã de forma esférica poderia desempenhar o papel da Terra e com o auxílio de pequenos imãs, demonstrava o comportamento daquilo que hoje chamamos de campo magnético terrestre, explicando a propriedade da agulha da bússola de sempre apontar para o Norte ou para o Sul, a declinação magnética e a inclinação magnética.

Por mais de um século e meio depois de Gilbert, nenhuma descoberta de importância fundamental foi realizada, embora houvesse muitos melhoramentos práticos na construção de magnetos. Assim, no século XVIII construíram-se muitos magnetos compostos de ferro, formados de muitas lâminas de ferro magnetizadas presas juntas, que levantavam corpos de ferro com pesos 28 vezes maior que seus próprios pesos. Isso é mais notável quando observamos que existia um único modo de fazer magnetos naquela época: o ferro ou o aço tinham que ser esfregados com um imã ou com outro magneto que por sua vez tinha que ter sido esfregado com imã.

No século XIX, o professor dinamarquês Hans Christian Oersted conseguiu provar experimentalmente, em 1820, que quando uma corrente elétrica passava ao longo de um fio aparecia um campo magnético e André-Marie Ampère, na França, entre 1821 e 1825, esclareceu o efeito de uma corrente sobre um imã e o efeito oposto, de um imã sobre uma corrente.

A pesquisa em materiais com propriedades magnéticas começou, pode-se dizer, com a invenção do eletromagneto, em 1825, uma vez que com ele se tornou possível obter campos magnéticos muito mais intensos do que aqueles produzidos por imãs ou magnetos feitos com eles. Nos anos seguintes, Michael Faraday, na Inglaterra, iniciou suas pesquisas argumentando que se uma corrente num fio produzia efeitos magnéticos, como Ampère tinha demonstrado, o inverso poderia ser verdadeiro, isto é, um efeito magnético poderia produzir uma corrente elétrica. Para testar essa hipótese, Faraday enrolou duas espiras de fio num anel de ferro, uma ligada a uma bateria e a outra, ligada a um medidor de corrente elétrica, verificando a existência, na segunda espira, de uma corrente temporária quando ligava e desligava a bateria. Noutra experiência, Faraday usou uma espira enrolada em uma

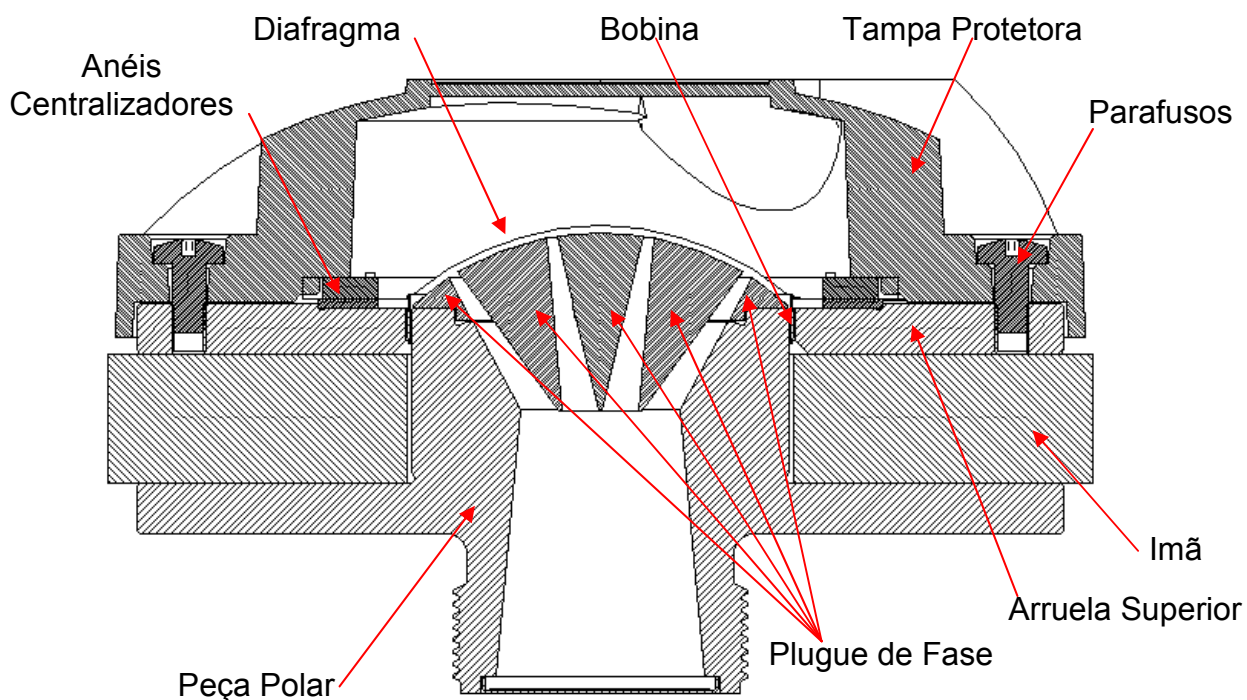
haste de ferro e dois imãs em forma de barra para demonstrar que os imãs, por si sós, podiam produzir uma corrente. Para explicar como a eletricidade e o magnetismo podiam afetar um ao outro no espaço vazio, Faraday propôs a idéia de um campo, imaginando linhas de força magnética tanto mais próximas umas das outras quanto mais intenso era esse campo e supondo que essas linhas tendiam a se encurtar sempre que possível e a se repelir mutuamente. Mais tarde, em 1837, Faraday introduziu também a idéia de linhas de força elétrica.

A análise matemática completa dos fenômenos elétricos e magnéticos aceita hoje, apareceu em 1873, quando o escocês James Clerk Maxwell publicou seu Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo.

Em 1982 a empresa japonesa Sumitomo Special Metals desenvolve um produto chamado NEOMAX, que posteriormente viria a criar uma empresa com este mesmo nome, este produto seria um composto de Neodímio – Ferro e Boro, este composto então viria a ser o imã com maior força magnética até então descoberto. Este imã foi estratégico para a Sumitomo, pois viria a revolucionar a tecnologia eletroeletrônica, sendo este imã responsável pela miniaturização de muitos motores e servos para pequenos dispositivos utilizados principalmente na área de informática, mais precisamente em hard-drivers. E este imã começou a ter utilidades e várias outras áreas como medicina, satélites, eletrônica embarcada e alto-falantes.

### 2.3 .Alto-falante do tipo driver de compressão

A Figura 2 apresenta um desenho em corte de um alto-falante tipo driver de compressão, onde é possível visualizar suas partes e características, a saber:



**Figura 2 - Alto-falante do tipo driver de compressão**

**Diafragma** – este é composto de um material leve e rígido que deve suportar grandes compressões de ar sobre o plugue de fase, em geral utiliza-se como material uma fina chapa de titânio moldado por processo mecânico, que possui uma excelente estrutura e pouco peso devido à pequena espessura utilizada, que em geral é menor que 0.1mm, como a espessura é muito pequena, emprega-se uma estrutura na superfície do diafragma para evitar módulos de vibração no mesmo.

**Bobina** – a bobina móvel fornece a força necessária para que o diafragma possa comprimir o ar sobre o plugue de fase; esta força é obtida aplicando-se uma diferença de potencial senoidal nos seus terminais, o que irá gerar uma corrente através do enrolamento, tendo o fluxo magnético atravessando perpendicularmente o enrolamento da bobina, irá ocorrer uma força, que conforme a polaridade, irá puxar o diafragma contra o plugue de fase ou irá afastá-lo.

Plugue de fase – É muito similar a um transformador, na região onde o diafragma comprime o ar existem pequenas aberturas, por onde o ar passa, nesta região existe alta pressão e baixa vazão, e na outra extremidade do plugue de fase, onde iremos ter uma grande abertura, existirá uma baixa pressão e alta vazão, então podemos concluir que no plugue de fase trabalha como um transformador ou casador de impedância.

Arruela superior – na arruela superior é onde se localiza um dos pólos do entreferro, ela é responsável por direcionar as linhas de fluxo do imã para o entreferro, e também possui a função de centrar a bobina através dos anéis de centragem, assim como fixar mecanicamente a tampa de proteção. Em geral utiliza-se aço de baixo carbono, que possui uma permeabilidade boa para conduzir o fluxo magnético.

Peça polar – a peça polar é onde se localiza o segundo pólo magnético, assim como a arruela superior, concentra o fluxo magnético para o entreferro, porém possui outras funções, como fixação da corneta através de uma rosca que é usinada na parte oposta ao entreferro, e é na peça polar que se fixa o plugue de fase, também é por onde o som é conduzido até a corneta. Assim como a arruela superior, a peça polar é construída com aço de baixo teor de carbono. Este material constitui-se em um caminho de baixa relutância magnética, conduzindo o fluxo magnético até o entreferro.

Imã – o imã fornece o fluxo magnético que irá se estabelecer através do circuito magnético formado pela arruela superior e pela peça polar. O fato de utilizarmos o imã do tipo Neodímio-Ferro-Boro, permite que tenhamos 3,9 vezes mais produto magnético do que os ímãs convencionais de Ferrite de Bário.

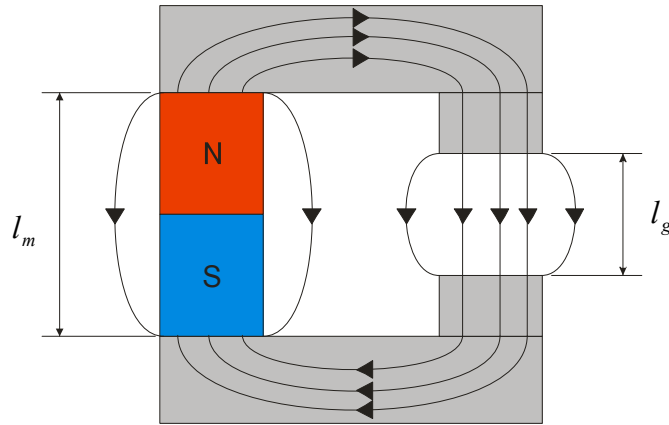
Anéis de centragem – estes possuem a função de posicionar o diafragma concêntrico com o entreferro e o plugue de fase, com isto irá automaticamente centrar a bobina no entreferro.

Parafuso – eles fixam a tampa protetora e toda a estrutura dos anéis de centragem e o diafragma.

Tampa protetora – esta serve para proteger contra impactos o diafragma e isolar o som da parte posterior que sai do diafragma, para não haver ruídos espúrios.

### 3.Principais conceitos do magnetismo

Aplicando a lei de Ampère à configuração mostrada na Figura 3 ao longo as linha média e seguindo as linhas de fluxo concatenado, pode-se obter:



**Figura 3 - Circuito magnético com ímã permanente**

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI = 0 \quad (1)$$

Uma vez que não há correntes presentes. Vamos, agora, considerar a contribuição das diferentes partes da topologia, isto é o ímã permanente, o ferro e o entreferro, na equação (1)

$$\int_{lm} H_m \cdot dl_m + \int_{lFe} H_{Fe} \cdot dl_{Fe} + \int_{lg} H_g \cdot dl_g = 0 \quad (2)$$

Para simplificar a análise, considera-se que o ferro tenha uma permeabilidade magnética muito alta. Assim  $H_{Fe} \cong 0$  e a equação fica

$$\int_{lm} H_m \cdot dl_m + \int_{lg} H_g \cdot dl_g = 0 \quad (3)$$

Nós podemos resolver as integrais na equação (3) assumindo que  $H_m$  e  $H_g$  são constantes ao longo de  $l_m$  e  $l_g$ , respectivamente. Isto nos dá como resultado

$$H_m.L_m + H_g.L_g = 0 \quad (4)$$

E de outra forma

$$H_m = -H_g \cdot \frac{l_g}{l_m} \quad (5)$$

A equação (5) mostra que o campo do imã permanente,  $H_m$ , está na direção oposta a seu fluxo magnético  $\Phi_m$ , isto quer dizer que o imã, nestas condições, opera no segundo quadrante de sua característica  $BH$ .

Como sabemos

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_o} \quad (6)$$

A próxima equação pode ser escrita no pressuposto de que não há fluxo disperso presente, consequentemente.

$$\Phi_m = \Phi_g \quad (7)$$

Isto significa que

$$B_m.S_m = B_g.S_g \quad (8)$$

Combinando as equações (6), (8) a equação (5) fica

$$H_m = -\frac{B_m}{\mu_o} \cdot \frac{l_g}{l_m} \cdot \frac{S_m}{S_g} \quad (9)$$

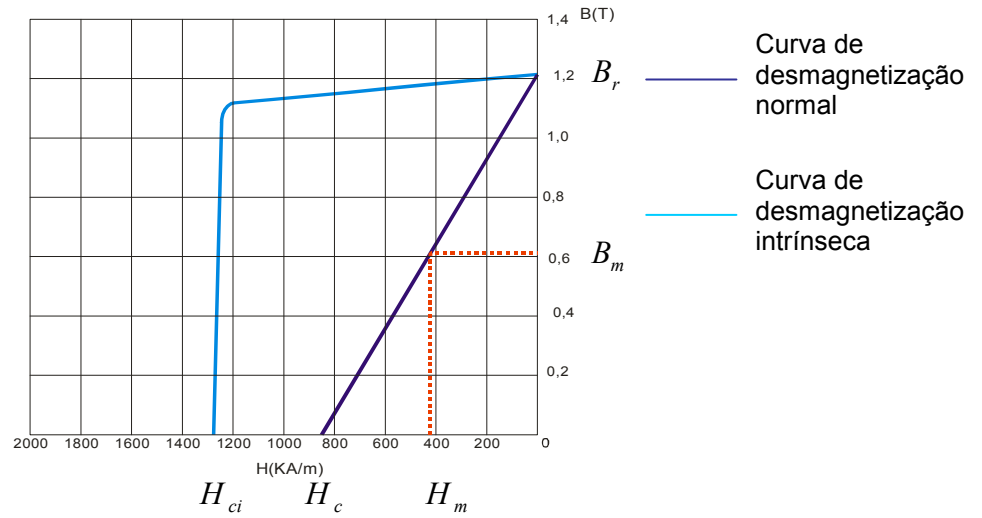


Ou ainda pode ser escrito da seguinte forma:

$$\frac{B_m}{H_m} = -\mu_o \cdot \left( \frac{l_m}{l_g} \right) \cdot \left( \frac{S_g}{S_m} \right) \quad (10)$$

Que é a reta de carga do imã permanente apresentada na Figura 4.

E podemos considerar que o fluxo magnético do imã é igual ao fluxo no entreferro considerando espraçamento ( $C_e$ ).



**Figura 4 - Característica de segundo quadrante de um ímã permanente e sua reta de carga**

Quando o fluxo disperso é considerável, nós podemos introduzir seus efeitos na equação [10]. Primeiramente, vamos definir um fator de fluxo disperso, chamado  $L_f$ , como segue:

$$L_f = \frac{\Phi_g + \Phi_l}{\Phi_g} = \frac{\Phi_m}{\Phi_g} = \frac{B_m \cdot S_m}{B_g \cdot S_g} \quad (11)$$

Considera-se que a estimativa de  $L_f$  como “a mais problemática dificuldade que o projetista pode enfrentar”  $L_f$  depende da geometria do sistema e da distribuição da permeabilidade pelo volume deste. Um outro problema é que não se sabe sempre como definir  $\Phi_g$ . Há uma tendência a considerar-se  $\Phi_g$  não como fluxo que atravessa o entreferro, mas como o fluxo útil. Aqui  $\Phi_g$  será a parte do fluxo

do ímã permanente que alcançará a porção ferromagnética do outro lado do entreferro através deste. Geralmente a razão de  $\frac{S_g}{S_m}$  é o fator de franjamento ou espraçamento, isto é  $C_e$ . Ele mostra como o fluxo no entreferro se espalha, fazendo com que  $S_g$  seja maior que  $S_m$ . Assim  $C_e \geq 1$ .

#### 4. Modelo analítico do Alto-Falante

O comportamento da distribuição do fluxo magnético no entreferro é determinado pelo ponto de operação dos ímãs permanentes e pela reação da armadura produzida pelos condutores percorridos por corrente. Esta distribuição pode ser determinada usando um modelo analítico. O método de análise, que será apresentado, está baseado em um modelo bidimensional, desenvolvido em coordenadas retangulares para descrever o comportamento da densidade de fluxo magnético no entreferro em função dos campos magnéticos produzidos pelos ímãs permanentes, porque o campo de reação da armadura é muito pequeno e pode ser desprezado. A permeabilidade do ferro é considerada infinita, assim a queda de potencial magnético a ser considerada ocorre no entreferro.

A análise de campos magnéticos é realizada em termos de dois tipos de funções potenciais: o potencial vetor magnético e o potencial escalar magnético. A descrição clássica de campos eletromagnéticos é feita em termos das equações de Maxwell, um sistema de equações diferenciais envolvendo os campos e as densidades de fluxo. As equações dos potenciais comumente empregadas na análise do campo magnético, e que são mais fáceis de resolver, derivam-se das equações de Maxwell. As grandezas eletromagnéticas envolvidas são o vetor intensidade de campo elétrico,  $\vec{E}$ , o vetor densidade de fluxo elétrico ou indução elétrica,  $\vec{D}$ , o vetor intensidade de campo magnético,  $\vec{H}$ , o vetor densidade de fluxo magnético ou indução magnética,  $\vec{B}$ , o vetor densidade de corrente,  $\vec{J}$ , e a densidade de carga,  $\rho$ . Em problemas associados à quase-estática, as equações de Maxwell envolvidas na análise assumem a seguinte forma:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (12)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (13)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (14)$$

Se não houver fontes de corrente e se as grandezas não são variáveis com o tempo, as equações (12) e (13) assumem a forma  $\nabla \times \vec{H} = 0$  e  $\nabla \times \vec{E} = 0$ , respectivamente. Nas equações anteriores,  $\nabla$  é o operador nabla, que em coordenadas retangulares é igual a  $\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j}$ .

#### 4.1 Estudo de campos magnéticos aplicado ao alto-falante

Na análise do campo magnético produzido pelos ímãs permanentes, foi empregado o potencial escalar magnético.

#### 4.2 Campo magnético produzido pelo ímã permanente

A formulação a ser empregada na análise do campo magnético produzido pelos ímãs permanentes é a do potencial escalar magnético. Quando uma determinada região de um modelo em estudo não possui fontes de corrente, o rotacional do vetor  $\vec{H}$  é nulo ( $\nabla \times \vec{H} = 0$ ) e um potencial escalar magnético  $\psi$  pode ser definido, a partir do qual o campo  $\vec{H}$  é derivado, através da seguinte expressão:

$$\vec{H} = -\nabla \psi \quad (15)$$

A equação (4) indica que  $\vec{H}$  é igual ao gradiente negativo de um potencial escalar magnético  $\psi$ .

### 4.3 A equação de Laplace em Termos do Potencial Escalar Magnético

A relação entre os vetores  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  e  $\vec{M}$  é:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{M} + \vec{H})$$

Em uma região onde exista apenas ar, como o entreferro do alto-falante, o vetor  $\vec{M}$  é nulo e a aplicação das equações (13) e (14) à equação  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$  resultará em:

$$\nabla \cdot \vec{B} = \mu_0 \nabla \cdot \vec{H} = \mu_0 \nabla \cdot (-\nabla \psi_g) = 0 \quad (16)$$

Onde  $\psi_g$  representa o potencial escalar magnético no entreferro. Em coordenadas retangulares, a equação (16) assume a forma:

$$\frac{\partial^2 \psi_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_g}{\partial y^2} = 0 \quad (17)$$

que é a equação de Laplace em termos do potencial escalar magnético no entreferro do alto-falante. O modelo analítico, que descreve o comportamento do potencial escalar magnético no entreferro, será obtido a partir de uma solução para a equação (17) que satisfaça as condições de fronteira impostas para o problema. Supondo que  $\psi_g$  possa ser expresso como o produto de três funções  $X(x)$  e  $Y(y)$  obtém-se:

$$\psi_g(x, y) = X(x)Y(y) \quad (18)$$

Onde  $X(x)$  é a função de  $x$  somente e  $Y(y)$  é a função de  $y$  somente. Introduzindo-se as duas funções na equação (17), tem-se

$$Y \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial^2 x^2} + X \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial^2 y^2} = 0 \quad (19)$$

A equação pode ser reescrita como:

$$\frac{1}{X} \cdot \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \cdot \frac{d^2 Y}{dy^2} = 0 \quad (20)$$

Como a soma dos dois termos à esquerda da equação anterior é igual a uma constante (zero), e cada variável é independente, cada termo deve ser igual a uma constante. Separando-se as variáveis, obtém-se o seguinte conjunto de equações:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} = \alpha^2 X \quad \frac{d^2 Y}{dy^2} = \beta^2 Y \quad (21)$$

$$\alpha^2 + \beta^2 = 0 \quad (22)$$

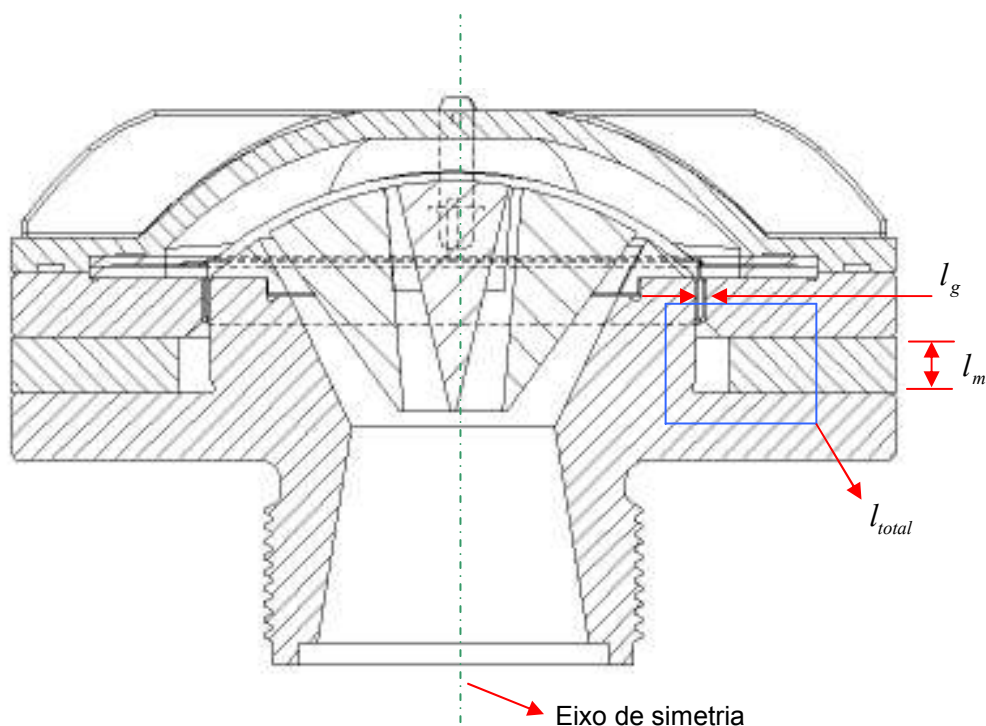
Como solução geral para as equações em (21) será:

$$X(x) = A_1(e^{\alpha x} - e^{-\alpha x}) \quad \text{e} \quad Y(y) = B_1(e^{\beta x y} - e^{-\beta y}) \quad (23)$$

Substituindo as duas equações anteriores em (18) obtém-se a solução geral da equação de Laplace

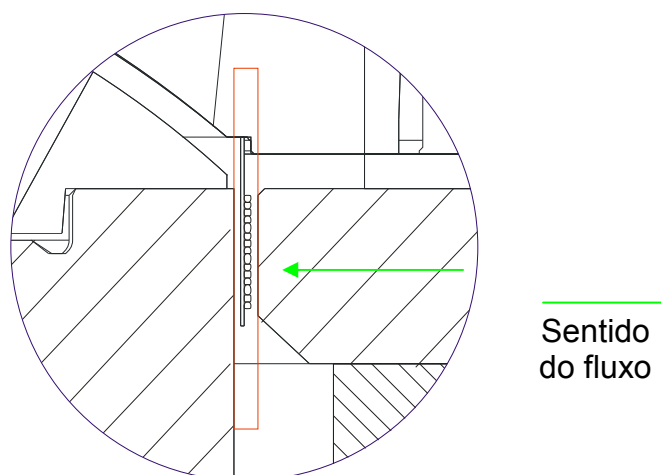
$$\psi(x, y) = X(x)Y(y) = A_1(e^{\alpha x} - e^{-\alpha x})B_1(e^{\beta x y} - e^{-\beta y}) \quad (24)$$

Na equação (24),  $A_1$  e  $B_1$  são constantes arbitrárias, que devem satisfazer a equação de Laplace, as condições de fronteira impostas para o modelo e as condições do campo magnético na região dos ímãs permanentes, assim como  $\alpha$ , e  $\beta$  devem satisfazer a equação (22). A Figura 5 mostra as vistas em corte da geometria em estudo, onde  $l_g$  é o comprimento do entreferro,  $l_m$  é o comprimento axial do ímã permanente e  $l_{total}$  é o comprimento total do circuito magnético. Na elaboração do modelo, foi suposto que há simetria na geometria, com isto calculando uma secção da geometria irá valer para qualquer outra secção do modelo.



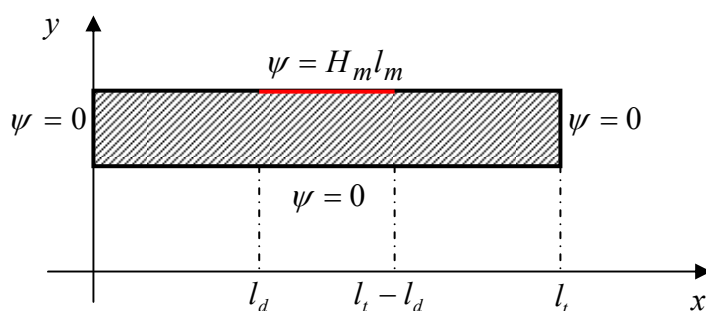
**Figura 5 - Vista em corte da geometria em estudo**

Considerando a geometria vamos delimitar a área de análise na região do entreferro, como pode ser visto na Figura 6.



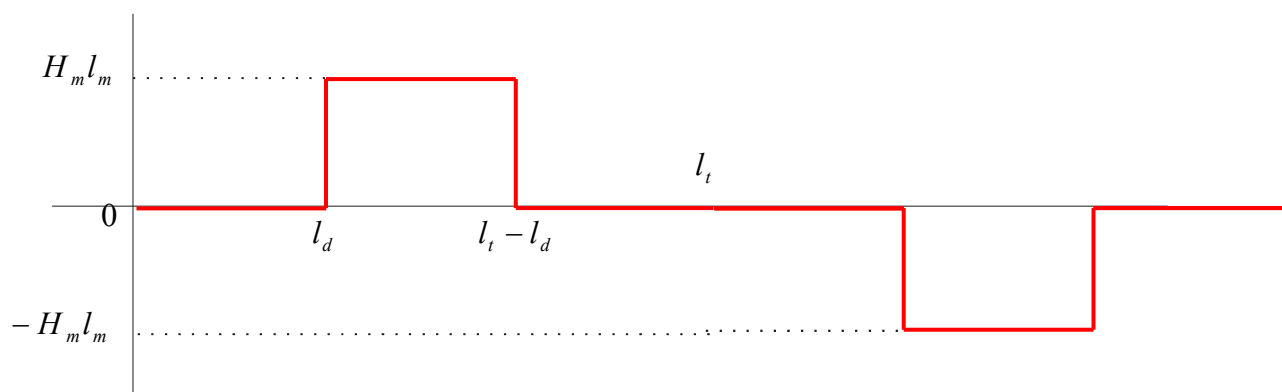
**Figura 6 - Detalhe A, região do circuito magnético onde serão focados os cálculos.**

Extraindo esta região da geometria e girando, conseguimos delimitar a linha de potencial na Figura 7.



**Figura 7 - Região do entreferro com os potenciais magnéticos indicados**

Baseado na Figura 8 extraímos o gráfico da Figura 7, que representa a nossa linha potencial



**Figura 8 - Gráfico representando a linha potencial de uma das paredes do entreferro**



Considerando que em  $x = 0 \rightarrow \psi = 0$  e que  $y = 0 \rightarrow \psi = 0$  e inserindo esta condição em  $X(x) = A_1(e^{\alpha \cdot x} - e^{-\alpha \cdot x})$  pode-se concluir que:

$$X(0) = A_1 + B_1 = 0 \quad (25)$$

Aplicando-se a condição que  $x = l_t$ , em  $X(x) = A_1(e^{\alpha \cdot x} - e^{-\alpha \cdot x})$ , obtém-se:

$$X(x) = A_1(e^{\alpha \cdot l_t} - e^{-\alpha \cdot l_t}) \quad (26)$$

Pela equação (26) produzimos a seguinte equação:

$$e^{\alpha \cdot l_t} = e^{-\alpha \cdot l_t}$$

Onde poderemos verificar que

$$\frac{e^{\alpha \cdot l_t}}{e^{-\alpha \cdot l_t}} = 1 \quad e^{2 \cdot \alpha \cdot l_t} = 1$$

E aplicando a identidade de Euler ( $e^{j \cdot \theta} = \cos(\theta) + j \sin(\theta)$ ) verifica-se:

$$\cos(\theta) = 1 \Rightarrow \cos(2 \cdot \alpha \cdot l_t) = 1$$

$$2 \cdot \alpha \cdot l_t = 2 \cdot \pi \cdot n$$

Isolando  $\alpha$  obtém-se:

$$\alpha = j \frac{\pi.n}{lt}$$

E por fim substitui-se na identidade de Euler

$$e^{j^2 \cdot \frac{\pi.n}{lt}} = \cos\left(\frac{2.\pi.n.lt}{lt}\right) + j.\sin\left(\frac{\pi.n}{lt}\right) \quad (27)$$

Retomando a equação (22) consegue-se distinguir o termo complexo e o real

$$\alpha^2 + \beta^2 = 0$$

$$\alpha^2 = -\beta^2$$

$$\alpha = \sqrt{-\beta^2}$$

$$\alpha = j \frac{\pi.n}{lt} \quad \beta = \frac{\pi.n}{lt}$$

Substituindo  $\alpha$  e  $\beta$  nas equações (23) tem-se

$$X(x) = A_1 \left( e^{j \cdot \frac{\pi.n.x}{lt}} - e^{-j \cdot \frac{\pi.n.x}{lt}} \right) \text{ e } Y(y) = B_1 \left( e^{\frac{\pi.n.y}{lt}} - e^{-\frac{\pi.n.y}{lt}} \right) \quad (28)$$

Com isto a nossa equação do potencial fica escrita desta forma

$$\psi(x,y) = X(x)Y(y) = A_1 B_1 \cdot \left( e^{j \cdot \frac{\pi.n.x}{lt}} - e^{-j \cdot \frac{\pi.n.x}{lt}} \right) \cdot \left( e^{\frac{\pi.n.y}{lt}} - e^{-\frac{\pi.n.y}{lt}} \right) \quad (29)$$

Substituindo pela identidade de Euler ( $e^\theta = \cosh(\theta) + \sinh(\theta)$ ) temos

$$\psi(x, y) = A_1 B_1 \cdot \left( \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{l_t}\right) + j \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{l_t}\right) - \left( \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{l_t}\right) - j \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{l_t}\right) \right) + \cosh\left(\frac{\pi \cdot n \cdot y}{l_t}\right) + \sinh\left(\frac{\pi \cdot n \cdot y}{l_t}\right) \right) - \left( \cosh\left(\frac{\pi \cdot n \cdot y}{l_t}\right) - \sinh\left(\frac{\pi \cdot n \cdot y}{l_t}\right) \right)$$

Com a simplificação obtém-se

$$\psi(x, y) = A_1 B_1 \left( 2 \cdot j \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{l_t}\right) \right) \cdot \left( 2 \sinh\left(\frac{\pi \cdot n \cdot y}{l_t}\right) \right) \quad (30)$$

E considerando que  $A_1 B_1$  é uma constante pode-se atribuir um único valor de constante  $K$

$$\psi(x, y) = K \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{l_t}\right) \cdot \sinh\left(\frac{\pi \cdot n \cdot y}{l_t}\right) \quad (31)$$

Há a necessidade de existir outra equação que possa auxiliar na obtenção do valor de  $K$ , para isto deduz-se outra condição de contorno, analisando a curva potencial da Figura 9.

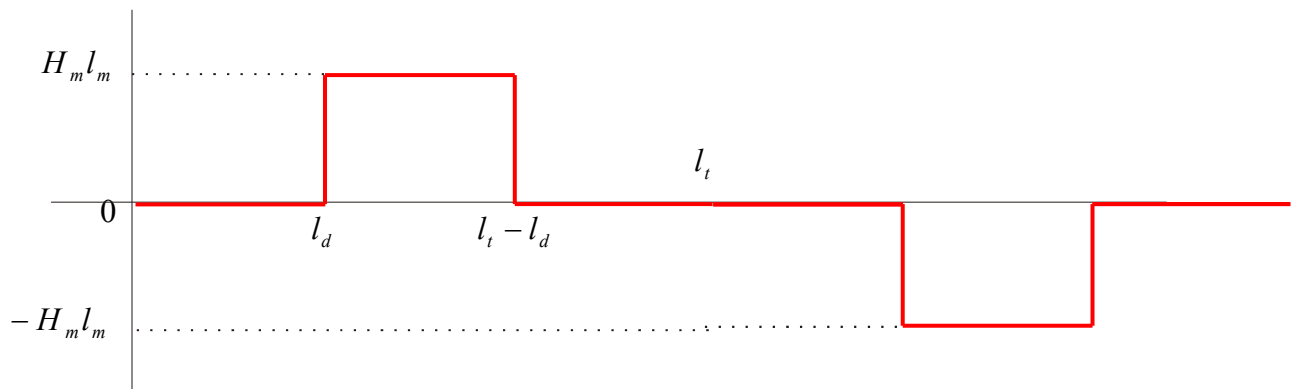


Figura 9 - Gráfico representando a linha potencial de uma das paredes do entreferro

Analisando a Figura 9 pode-se deduzir uma série de Fourier que represente o potencial desta linha, defini-se os limites das integrais da seguinte forma:

$$\psi = 0 \Rightarrow 0 \leq X \leq l_d$$

$$\psi = H_m \cdot l_m \Rightarrow l_d \leq X \leq (l_t - l_d)$$

$$\psi = 0 \Rightarrow (l_t - l_d) \leq X \leq l_t$$

Sendo a função ímpar, desconsidera-se o termo  $an$  e calcula-se  $bn$  e dessa forma podemos montar a seguinte série:

$$\psi(x, y) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} bn \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{T}\right) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} bn \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{2 \cdot l_t}\right) \quad (32)$$

Onde agora encontra-se  $bn$

$$b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot \sin(n\omega t) dt$$

Aplicando os limites e a função

$$b_n = \frac{2}{2l_t} \left[ \int_{l_d}^{(l_t-l_d)} H_m l_m \sin\left(\frac{2\pi n x}{2l_t}\right) dx \right]$$

Resolvendo a integral

$$b_n = -2 \cdot \frac{H_m l_m}{\pi n} \cdot \cos\left(\frac{\pi n l_d}{l_t}\right) \quad (33)$$

Agora substituindo a equação (33) em (32) obtém-se a segunda condição de contorno como se pode ver a seguir:

$$\psi(x, y) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} 2 \frac{H_m l_m}{\pi n} \cos\left(\frac{\pi n l_d}{l_t}\right) \sin\left(\frac{\pi n}{l_t} x\right) \quad (34)$$

Montando um sistema de equações com a equação (31) e (34)

$$\begin{cases} \psi(x, y) = K \cdot \sin\left(\frac{\pi n x}{l_t}\right) \cdot \sinh\left(\frac{\pi n y}{l_t}\right) \\ \psi(x, y) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 H_m l_m}{\pi n} \cdot \cos\left(\frac{\pi n l_d}{l_t}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n x}{l_t}\right) \end{cases}$$

Chegamos por sua vez em

$$K = \frac{2 H_m l_m}{\pi n} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\pi n l_d}{l_t}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi n l_g}{l_t}\right)} \quad (35)$$

Substituindo a equação (35) na equação (31) temos a equação do potencial no entreferro

$$\psi(x, y) = 2 H_m l_m \cdot \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{\pi n} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\pi n l_d}{l_t}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi n l_g}{l_t}\right)} \cdot \sin\left(\frac{\pi n x}{l_t}\right) \cdot \sinh\left(\frac{\pi n y}{l_t}\right) \quad (36)$$

#### 4.4 Definindo o ponto de operação do imã

Precisamos definir a constante  $H_m$  do nosso circuito magnético. Iremos calcular utilizando a equação (10), porém incluindo o coeficiente de espraçamento.

$$\frac{B_m}{H_m} = -\mu_o \cdot \left( \frac{l_m}{l_g} \right) \cdot \left( \frac{S_g}{S_m} \right) \cdot C_e \quad (37)$$

E iremos atribuir a  $C_e$  o valor de 1,5 que em função da geometria julgamos condizente.

Sendo os comprimentos do ferro e do entreferro, assim como suas áreas e o coeficiente de espraimento constantes, pode-se simplificá-los para facilitar a visualização das equações

$$\xi = \left( \frac{l_m}{l_g} \right) \cdot \left( \frac{S_g}{S_m} \right) \cdot C_e$$

Desta forma pode-se dizer que

$$B_m = -\mu_o \cdot \xi \cdot H_m \quad (38)$$

Utilizamos a equação da reta para podermos chegarmos a uma segunda equação que será utilizada em um sistema de equações afim de achar o valor de  $H_m$ , e utilizamos um coeficiente angular que iremos chamar de  $\Delta$ , assim temos que

$$B_m = \Delta \cdot H_m + \xi \quad B_m = 0 \text{ logo } H_m = H_c$$

Isolando  $\Delta$  temos

$$\Delta = -\left( \frac{\xi}{H_c} \right)$$

Substituindo pelos valores

$$l_m = 0.005m \quad l_g = 0.0008m$$

$$S_g = 0.00055273m^2 \quad S_m = 0.00095096m^2$$

$$C_e = 1.5 \quad \xi = 51.853311522$$

Pode-se chegar ao valor de  $\Delta$

$$\Delta = -\left(\frac{\xi}{H_c}\right) = 5.9738838159 \times 10^{-5}$$

Assim montar-se a seguinte equação

$$B_m = 5.9738838159 \times 10^{-5} \cdot H_m + \xi$$

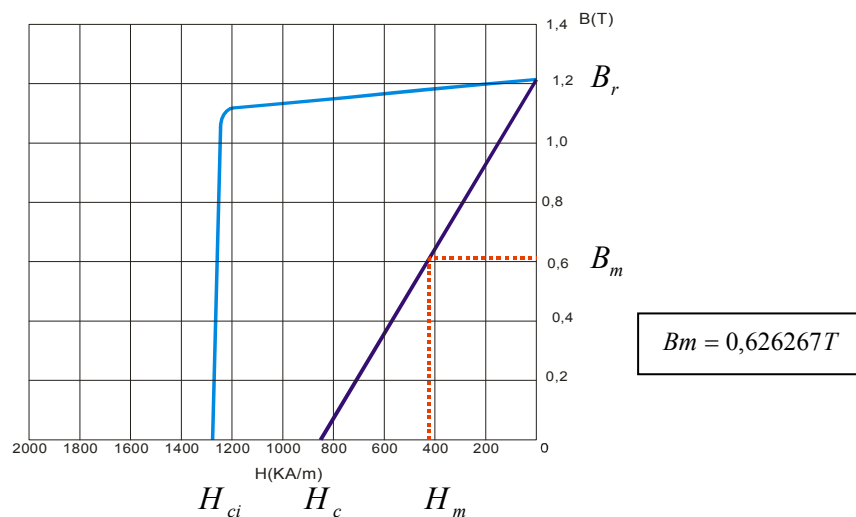
Substituindo  $B_m$  pela equação (38) obtemos

$$5.9738838159 \times 10^{-5} \cdot H_m + \xi = -\mu_0 \cdot \xi \cdot H_m$$

Isolando  $H_m$  temos

$$H_m = -415159,84 \text{ KA/m}$$

Substituindo na curva  $BH$  temos  $B_m$



**Figura 10 - Curva característica de segundo quadrante de um ímã permanente de Neodímio-Ferro-Boro e sua reta de carga**

Com isto podemos calcular a curva da densidade de fluxo no entreferro, derivando parcialmente conforme a equação de Laplace, e multiplicando pela permeabilidade extraímos a densidade de fluxo.

$$\vec{B} = \mu_o \cdot \left[ j \frac{\partial \psi(x, y)}{\partial x} + j \frac{\partial \psi(x, y)}{\partial y} \right] \quad (39)$$

Porém como somente  $x$  varia ( $y = l_g$ ), terá a seguinte equação:

$$\vec{B}(x) = \mu_o \cdot 2 \cdot H_m \cdot l_m \cdot \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{\pi \cdot n} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot l_d}{l_t}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi \cdot n \cdot l_g}{l_t}\right)} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{l_t}\right) \cdot \cosh\left(\frac{\pi \cdot n \cdot y}{l_t}\right) \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{l_t}\right)$$

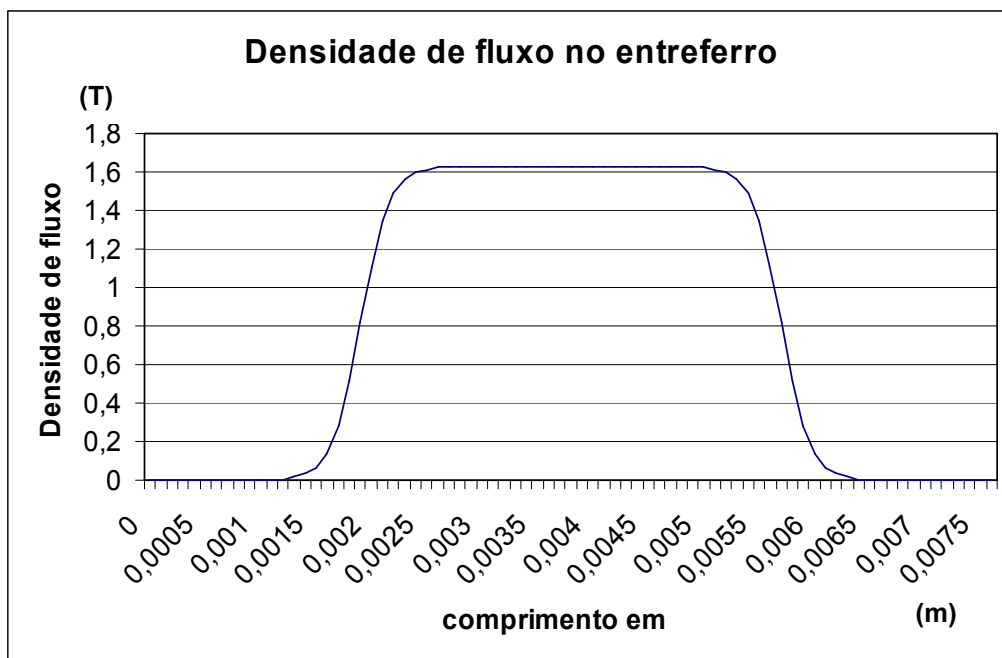
Sendo:

$$H_m \cdot l_m = 415159.84 \text{ KA} / \text{m} \times 0.005 \text{ m} = 2075.7992 \text{ A}$$

$$l_d = 0.0019 \text{ m} \quad l_g = 0.0008 \text{ m} \quad l_t = 0.0076 \text{ m}$$



Com isto pode-se gerar o gráfico que representa a densidade de fluxo na região do entreferro como segue na figura



**Figura 11 - <sup>2</sup>Gráfico analítico representando a densidade de fluxo no entreferro**

O valor máximo atingido pelo nosso modelo foi 1.63T na região central do entreferro.

<sup>2</sup>Ver os dados na “tabela que apresenta os pontos do cálculo analítico” nos anexos

## 5.O Método de Elementos Finitos

Os fenômenos Eletromagnéticos são completamente descritos pelas equações de Maxwell. No entanto, soluções analíticas não existem a não ser para geometrias simples. No caso de geometrias complexas, existe a possibilidade de obter-se soluções aproximadas utilizando métodos numéricos.

Um dos métodos numéricos mais conhecidos e versáteis é o método de Elementos Finitos (MEF). Este método pode ser aplicado a uma grande variedade de problemas físicos tais como eletromagnetismo, mecânica, acústica, etc. onde soluções analíticas das equações que regem os fenômenos físicos só existem para geometrias simples.

Para utilizar o MEF, o sistema (domínio) em estudo deve ter sua geometria subdividida (discretizada) em várias partes, os chamados elementos finitos. Esta discretização é chamada de malha de elementos, que consiste em geral de triângulos ou retângulos, ligados entre si pelos vértices, chamados nós.

Através da malha de elementos é montado um sistema de equações que permitem calcular as grandezas de interesse do fenômeno analisado. No caso do eletromagnetismo é o vetor potencial magnético em cada nó da malha que permite determinar o campo e o fluxo magnético.

É costume dividir o procedimento de utilização do método de elementos finitos em três etapas: Pré-processamento, Processamento e Pós-processamento.

- Pré-processamento: envolve o desenho da geometria do sistema estudado, a geração da malha de elementos, a definição das propriedades físicas dos materiais que constituem o objeto, definição dos valores de fontes de campo e definição de condições de contornos relativos ao fenômeno e sistema analisado.
- Processamento: inclui a montagem do sistema de equações a partir dos dados do pré-processamento e a sua solução.

- Pós-processamento: permite a utilização dos resultados através de procedimentos de cálculo e apresentação das grandezas do fenômeno estudado (gráficos de grandezas físicas, linhas de campo, etc.).

## 5.1 Flux2D

O software Flux2D (Cedrat/Magsoft) é um programa CAD “*Computer Aided Design ou Projeto Auxiliado por Computador*” que utiliza o Método de Elementos Finitos para simular fenômenos físicos. Este software foi desenvolvido pela Universidade Cedrat de Grenoble na França, e foi adquirido o módulo de simulação magnetostática pela Eletrônica Selenium S.A. em 1999, para auxiliar nos projetos de circuitos magnéticos dos alto-falantes.

As equações utilizadas no módulo magnetostático do Flux2D

A variável é o vetor potencial

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ A_z \end{pmatrix}$$

E o vetor é ortogonal à secção então há somente um componente e equação teórica é

$$\text{rot} \left( \left( \frac{1}{\mu} \right) \cdot \text{rot}(\vec{A}) \right) = \vec{J} + \vec{H}\vec{C}$$

Aplicando uma constante de normalização

$$\frac{1}{\mu_0}$$

A equação normalizada fica

$$\text{rot} \left( \left( \frac{1}{\mu_r} \right) \cdot \text{rot}(\vec{A}) \right) = \mu_0 \cdot \vec{J} + \mu_0 \cdot \vec{H}\vec{C}$$

Condições de contorno

Dirichlet:  $A_z = \text{constante}$

Homogênea de Neumann:  $\frac{dA_z}{dn} = 0$

Cíclica  $A_z(j=1, n) = A_z(i-1, n)$

Anticíclica  $A_z(j=1, n) = -A_z(i-1, n)$

Translação  $A_z(j=1, n) = A_z(i-1, n) + C$  onde C é constante

## 6. Simulação do circuito magnético de Neodímio-Ferro-Boro

### 6.1 Pré-processamento

#### 6.1.1 Geometria

A simulação começa pela geração da geometria em duas dimensões, onde iremos determinar as grandezas mecânicas das peças, nesta etapa definimos a posição de cada ponto ou vértice através de coordenadas cartesianas. Determinamos também o eixo de simetria, pois utilizamos somente uma das faces, o eixo de simetria fica posicionado sobre a linha de potencial nulo. Após serem posicionados os pontos, ligamos através de linhas.

Desconsideramos nesta etapa a rosca da peça polar por não representar alteração na simulação.

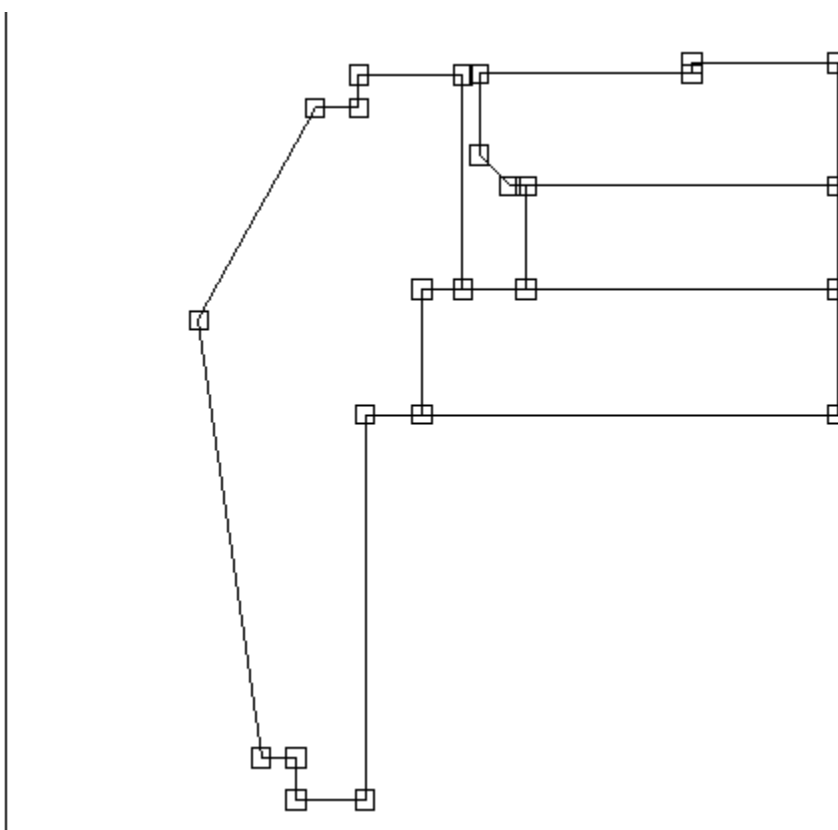
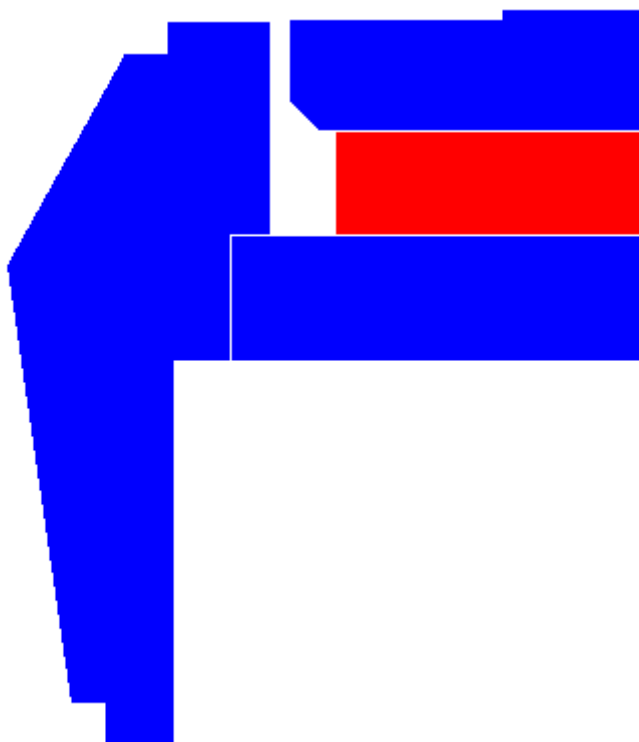


Figura 12 – Geometria no simulador com os vértices e linhas definidos

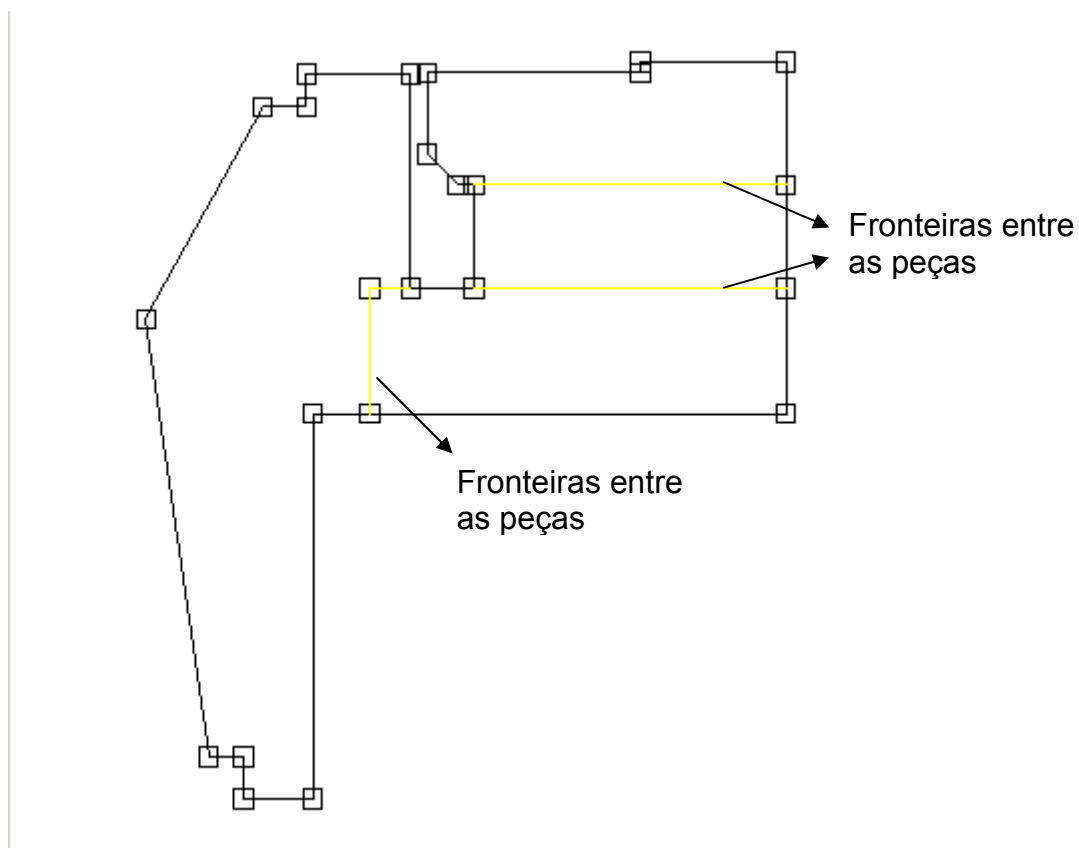
### 6.1.2 Definição das regiões

Nesta etapa, damos nomes para cada região delimitada, e definimos cores para separar visualmente os materiais. A cor azul foi adotada para os metais, o vermelho para o imã e o branco para o ar, podemos ver na Figura 13. Neste momento o software verifica se as geometrias estão fechadas, do contrário, ele não conseguirá delimitar onde começa e onde termina cada peça e cada material.



**Figura 13 - Geométrica no simulador com as regiões definidas e delimitadas**

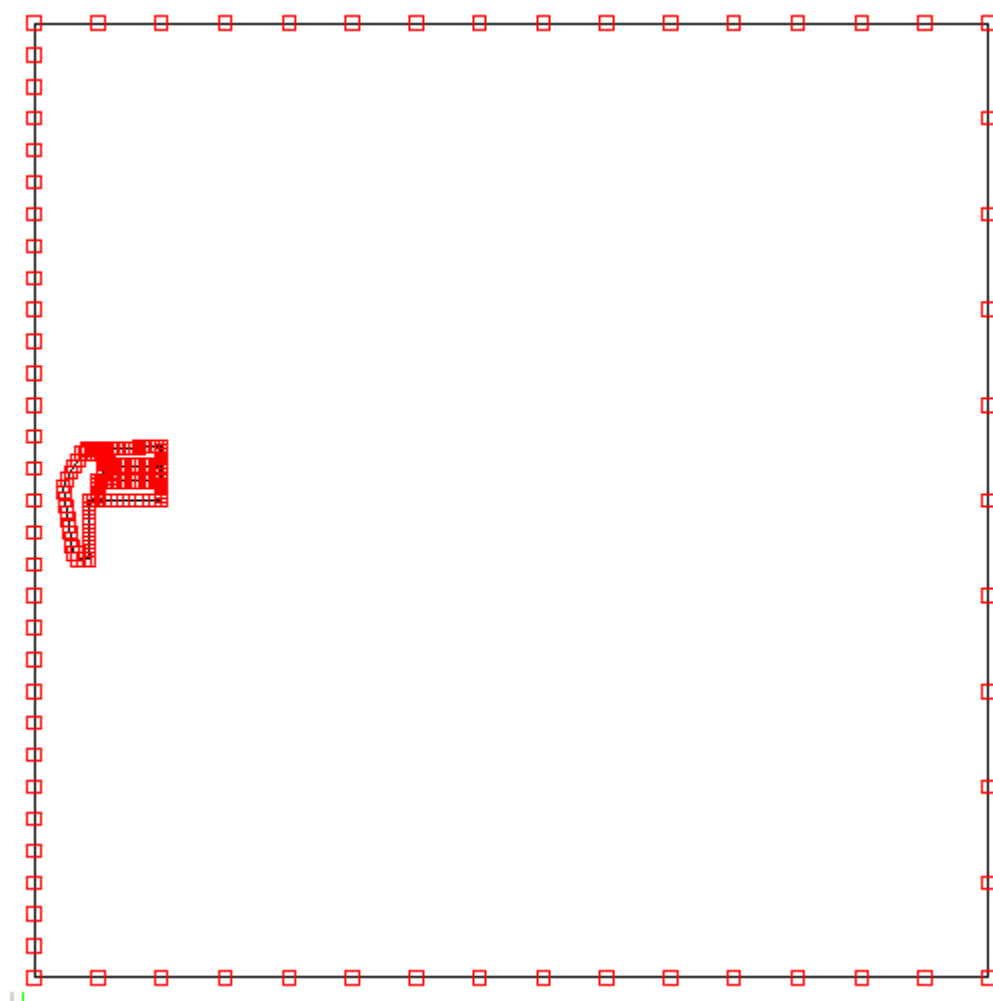
Outra região que deverá ser delimitada será a fronteira entre as peças, é a região onde a proximidade entre uma peça e outra é bem pequena, impedindo que consigamos gerar uma malha entre elas, a solução encontrada é definirmos estas regiões como cascas ou pequenos entreferros. Podemos ver estas regiões demarcadas em amarelo na Figura 14, estas regiões serão coladas e serão declaradas no módulo de propriedades físicas.



**Figura 14 – Geometria no simulador com as fronteiras de entreferros definidas**

### 6.1.3 Definição dos pontos da malha

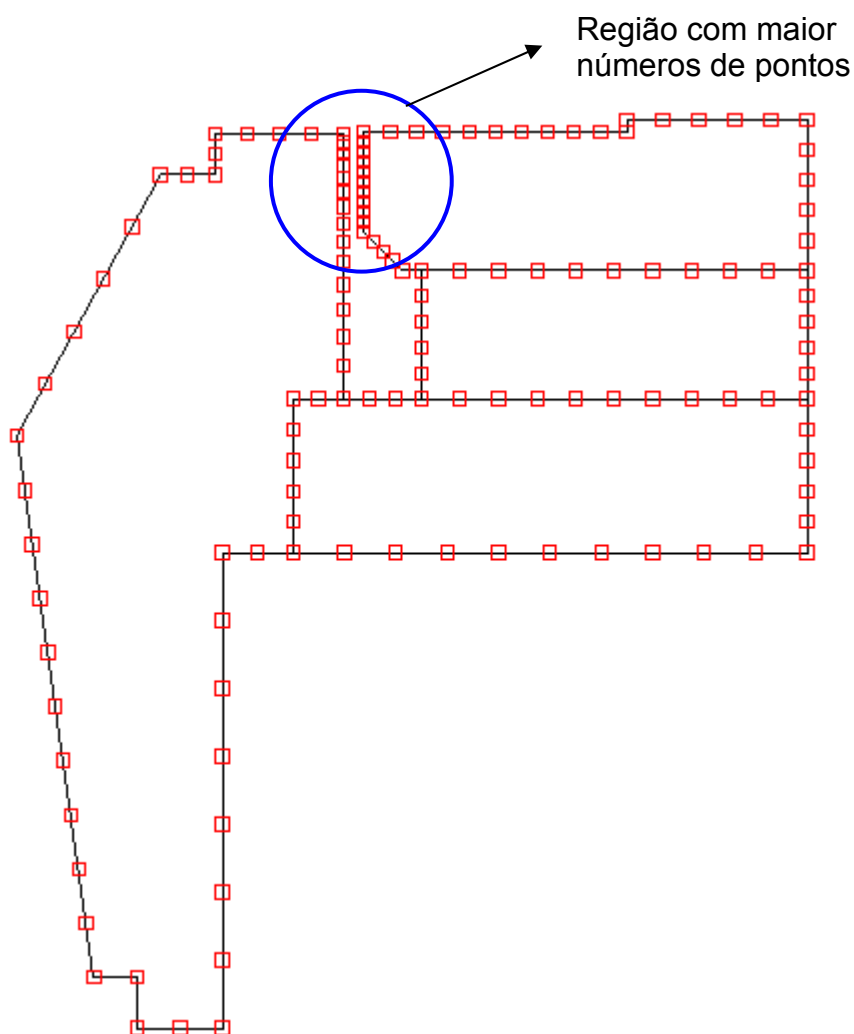
Nesta parte da simulação, definimos a quantidade de pontos que será subdividida as linhas para a geração da malha, pode-se notar na Figura 15 a discretização da malha aumenta à medida que se aproxima do circuito magnético, e aumenta ainda mais quando se aproxima do entreferro, isto deve-se ao fato de a região longe do circuito magnético a ser simulado não necessitar de tanta precisão.



**Figura 15 - Subdivisão das linhas para a geração dos vértices da malha**



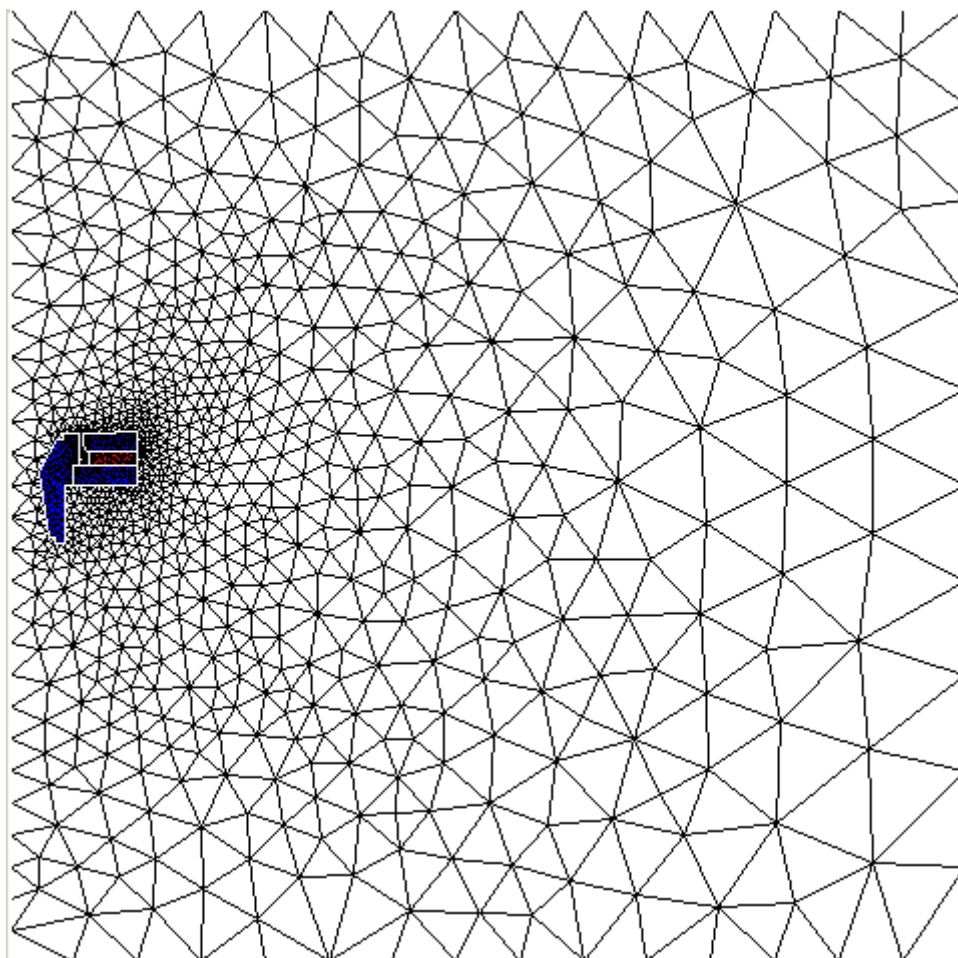
De uma melhor forma podemos ver na Figura 16 a distribuição dos pontos na geometria do circuito em questão, pode-se observar que na região do entreferro a densidade dos pontos é maior, permitindo uma maior precisão.



**Figura 16 - Detalhe da subdivisão das linhas para a geração dos vértices da malha**

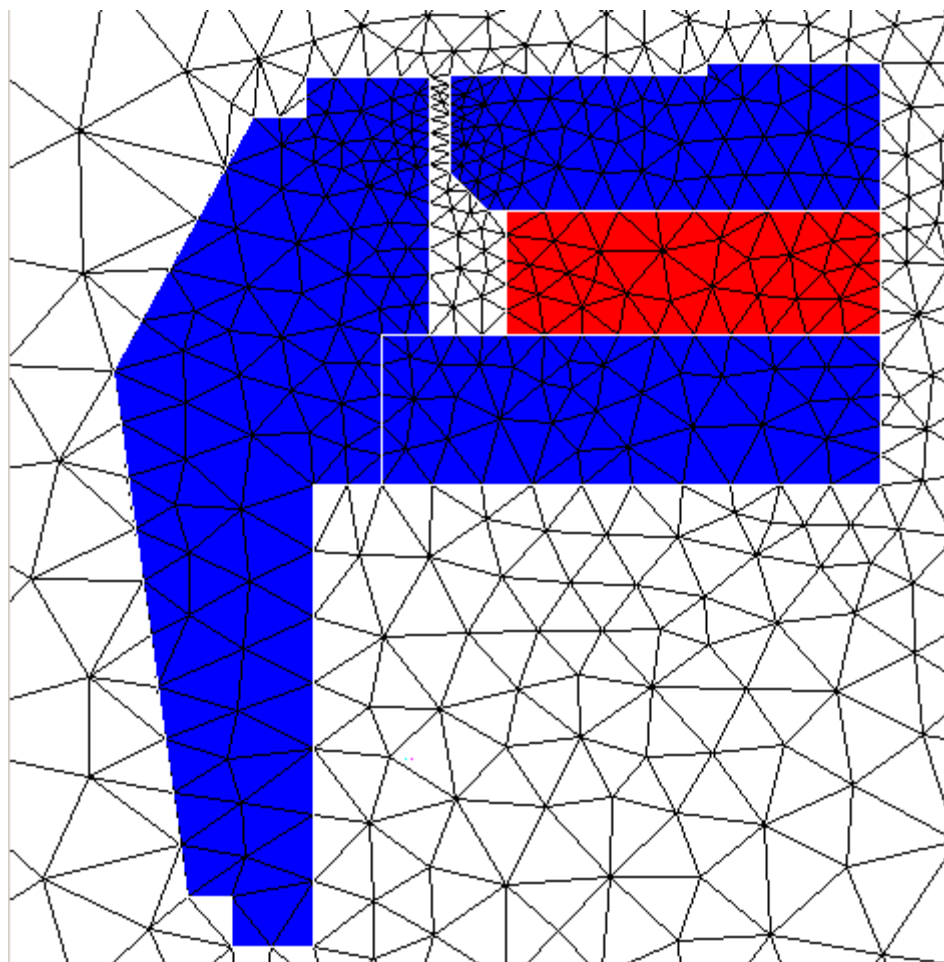
#### 6.1.4 Geração da malha

O Flux2D gera a malha automaticamente e se houvesse problemas de triângulos com ângulos muito agudos, ele acusaria neste momento com um quadrado verde ao redor do erro, analisando a Figura 17 constata-se que felizmente não houve e a simulação pode seguir adiante.



**Figura 17 - Malha gerada pelo Flux2D**

Na Figura 18 pode-se ver com detalhe a malha do circuito que está sendo simulado, pode-se constatar uma perfeita distribuição dos triângulos dentro da geometria e pode-se ver também que na região do entreferro a concentração de triângulos é maior que em outras regiões.



**Figura 18 - Detalhe da malha no circuito que está sendo simulado**

A próxima etapa é a caracterização dos materiais, que no nosso caso já estavam prontos em uma biblioteca, temos que somente determinarmos para cada região que material está sendo utilizado, no caso do ímã determinamos o sentido de magnetização, e nos pequenos entreferros dizemos que terão vácuos de 0.05mm de espessura e determinamos que a linha de potencial nulo como potencial nulo.

## 6.2 Processamento

### 6.2.1 Resolução da matriz.

Como se pode ver na Tabela 1 a resolução da matriz pelo método de Newton Raphson, onde foi solicitado de no máximo 10 interações e a precisão solicitada foi de 0.0001, desta forma podemos acompanhar a precisão obtida em cada interação.

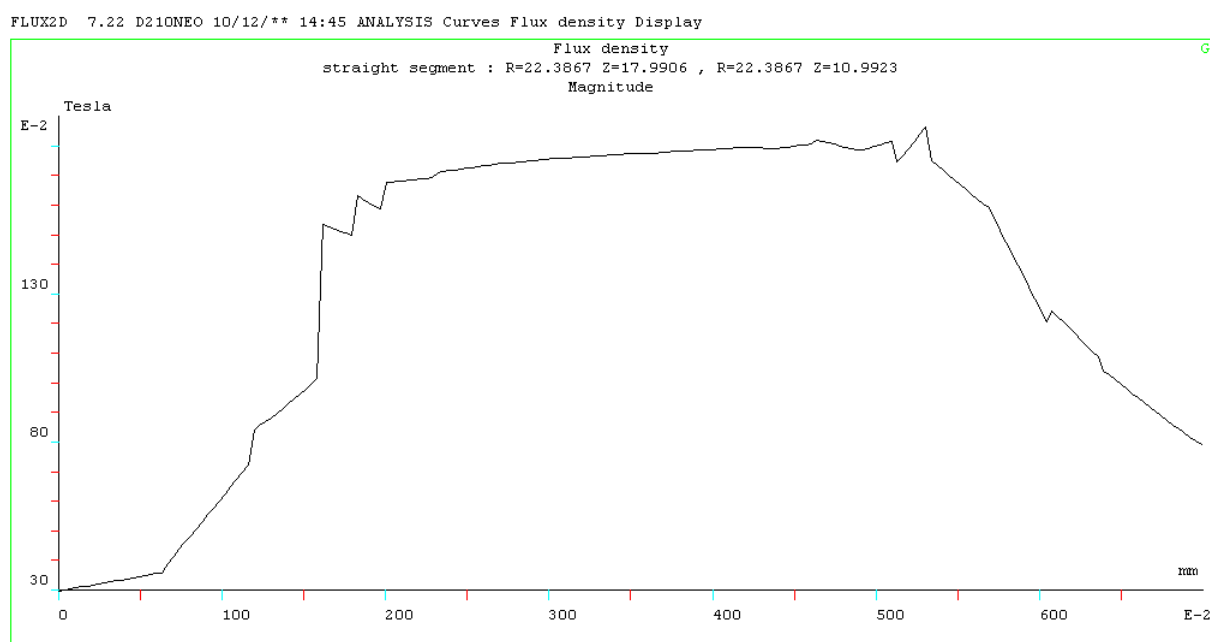
**Tabela 1 - Resolução da matriz pelo método de Newton Raphson**

```
D21ONEO
Data have been read
Non linear problem : Newton_Raphson's method
Do you want to use progressive algorithm ? ( default NO) :
Size of the matrix : 4139 lines
Average length of a line = 5 terms
Integration done, equations assembled
Equations solved
Maximum number of iterations : 10
Requested precision ( default .001) : 0.0001
Integration done, equations assembled
Equations solved
Iteration number 1
Relative variation with respect to the previous iteration .03363
Integration done, equations assembled
Equations solved
Iteration number 2
Relative variation with respect to the previous iteration .006797
Integration done, equations assembled
Equations solved
Iteration number 3
Relative variation with respect to the previous iteration .003385
Integration done, equations assembled
Equations solved
Iteration number 4
Relative variation with respect to the previous iteration .002151
Integration done, equations assembled
Equations solved
Iteration number 5
Relative variation with respect to the previous iteration .581E-03
Integration done, equations assembled
Equations solved
Iteration number 6
Relative variation with respect to the previous iteration .719E-04
The specified precision is reached
Do you want to change the precision ? ( default NO) :
```

## 6.3 Pós-processamento

### 6.3.1 Curva da densidade de fluxo

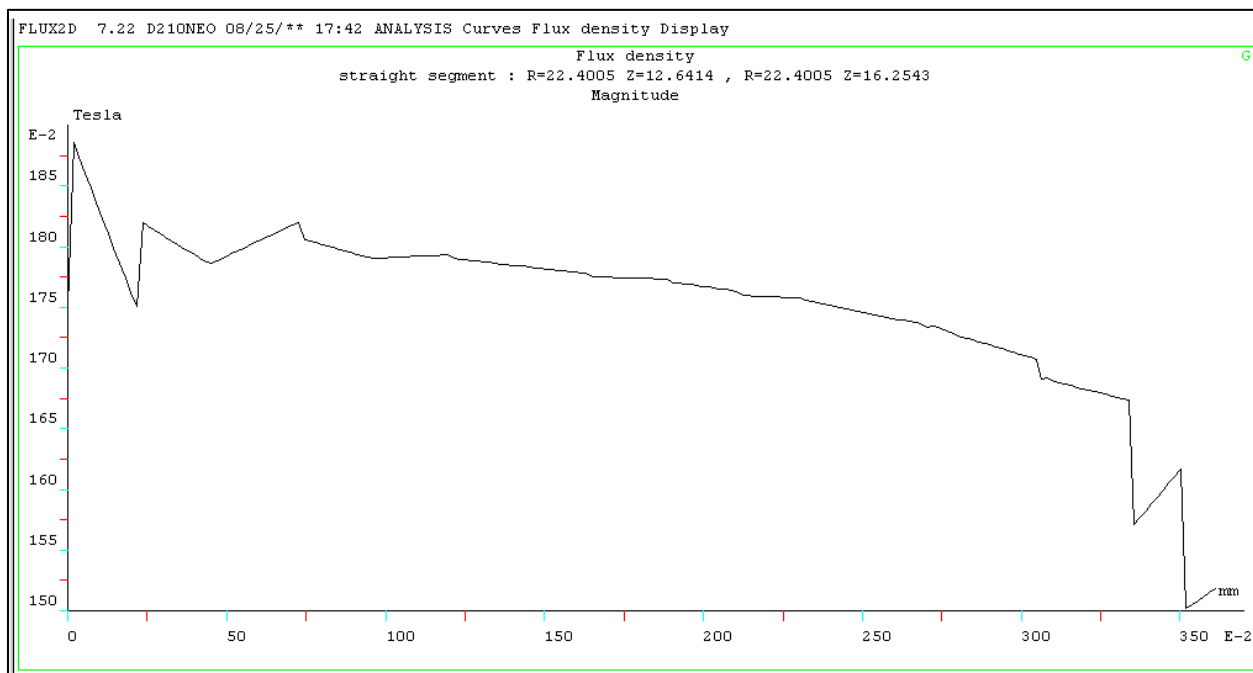
A figura 19 mostra a curva do módulo do vetor densidade de fluxo magnético em função da região onde se encontra a bobina



**Figura 19 – da densidade de fluxo na região do entreferro**

A Figura 20 mostra a curva do módulo do vetor densidade de fluxo magnético em função da região onde se encontra a bobina

Posicionando uma linha na mesma posição onde estaria a bobina dentro do entreferro, para conseguirmos uma curva de densidade de fluxo magnético conforme Figura 20, e pode-se verificar os valores que se apresentam nesta linha na Tabela 2.



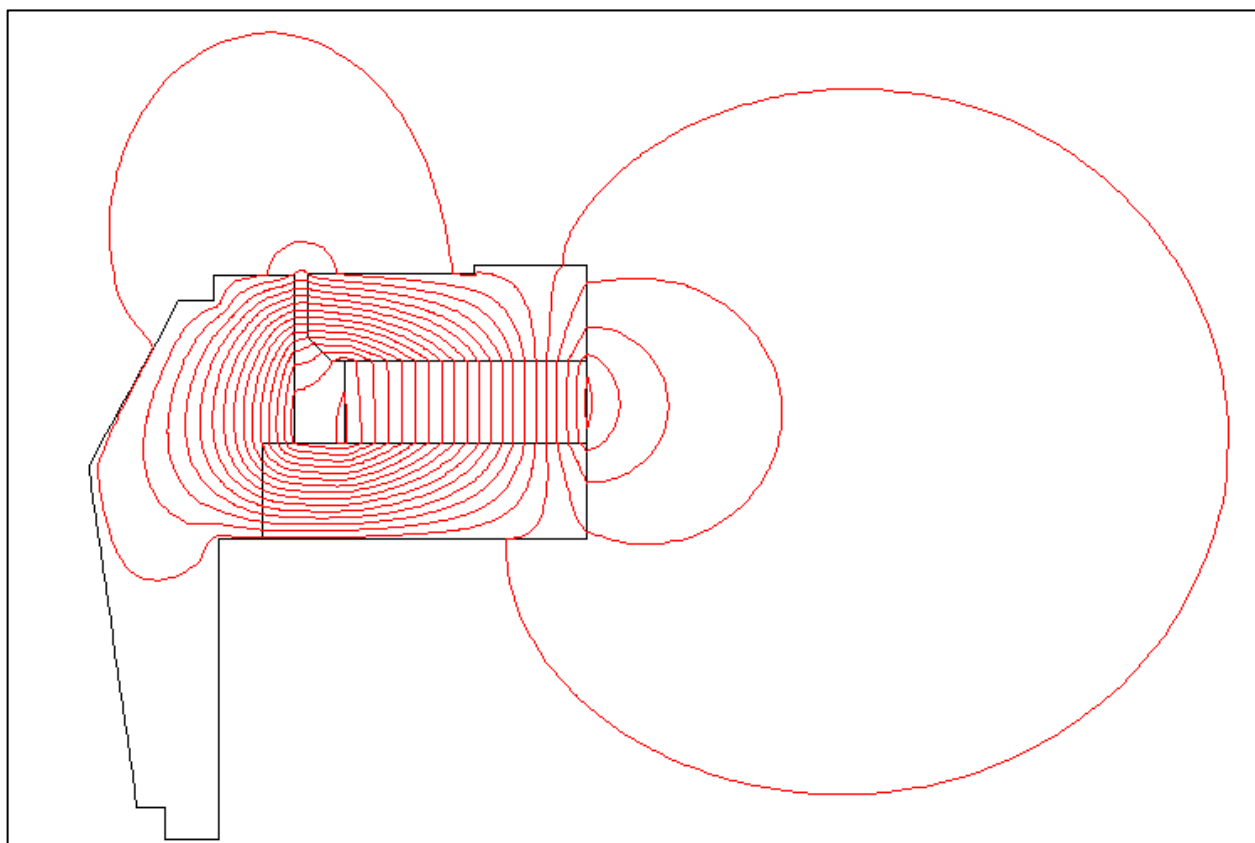
**Figura 20 – Curva da densidade de fluxo na região onde está localizada a bobina**

**Tabela 2 – Valores de densidade de fluxo na posição da bobina**

Flux density	
straight segment : R=22.3756 Z=16.252 , R=22.3756 Z=12.6518	
Magnitude	
Length	= 3.60015 mm
Mean value	= 1.75382 Tesla
Rectified mean value	= 1.75382 Tesla
R.m.s value	= 1.75497 Tesla

### 6.3.2 Linhas de fluxo

Na Figura 21 pode-se verificar o caminho percorrido pelas linhas de fluxo dentro do circuito magnético do alto-falante, com isto pode-se avaliar a distribuição das linhas e se há saturação magnética em algum ponto.



**Figura 21 – Linhas de campo percorrendo a geometria**

### 6.3.3 Mapa de cores

Nesta representação, Figura 22, pode-se verificar as regiões de saturação. A direita da Figura 22, consegue-se ver a escala de cores com as respectivas densidades de fluxo. Na medida em que a densidade de fluxo magnético aumenta, a escala de cores varia do azul escuro (valor mínimo de densidade de fluxo magnético) até o amarelo claro (máximo valor de densidade de fluxo magnético). Podemos verificar que as regiões coloridas com amarelo representam regiões em que o ferro apresenta-se mais saturado, mas em nenhum ponto foi verificado que o ponto saturação do metal foi atingido (aço 1010, B de saturação 1,95T).

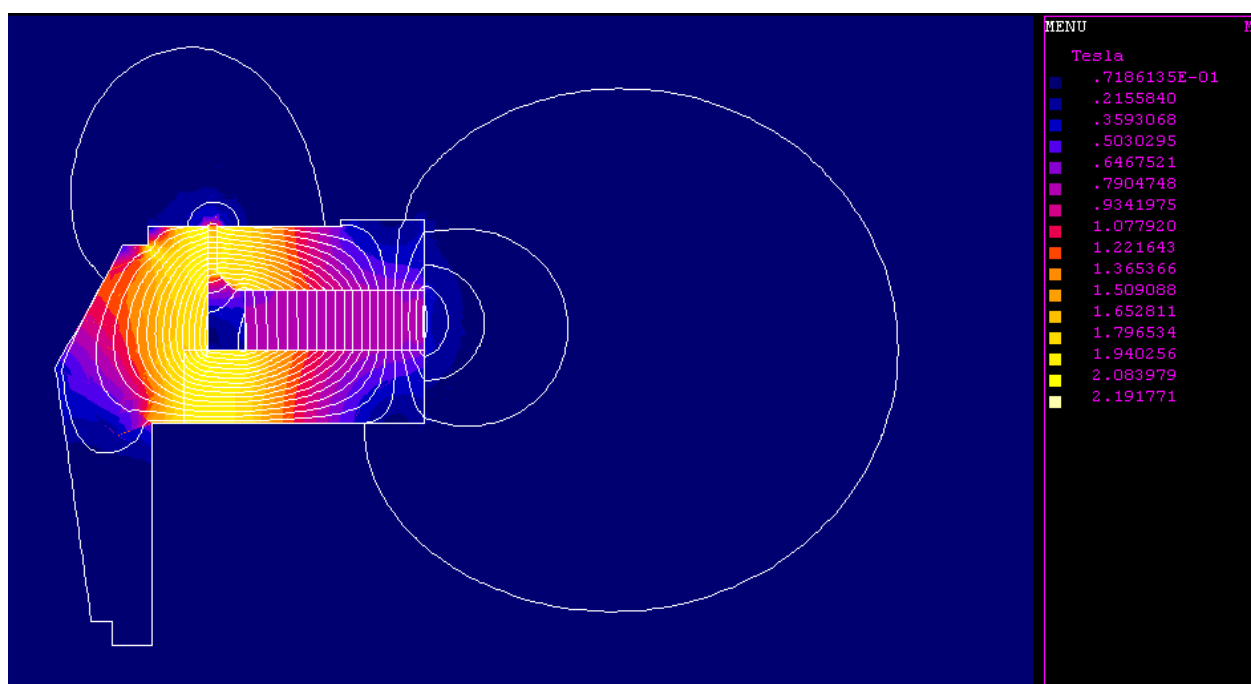


Figura 22 - Mapa de cores e linhas de campo sobrepostas do circuito magnético



Na Figura 23 pode-se ver com detalhe a distribuição da densidade de fluxo magnético na região do entreferro.

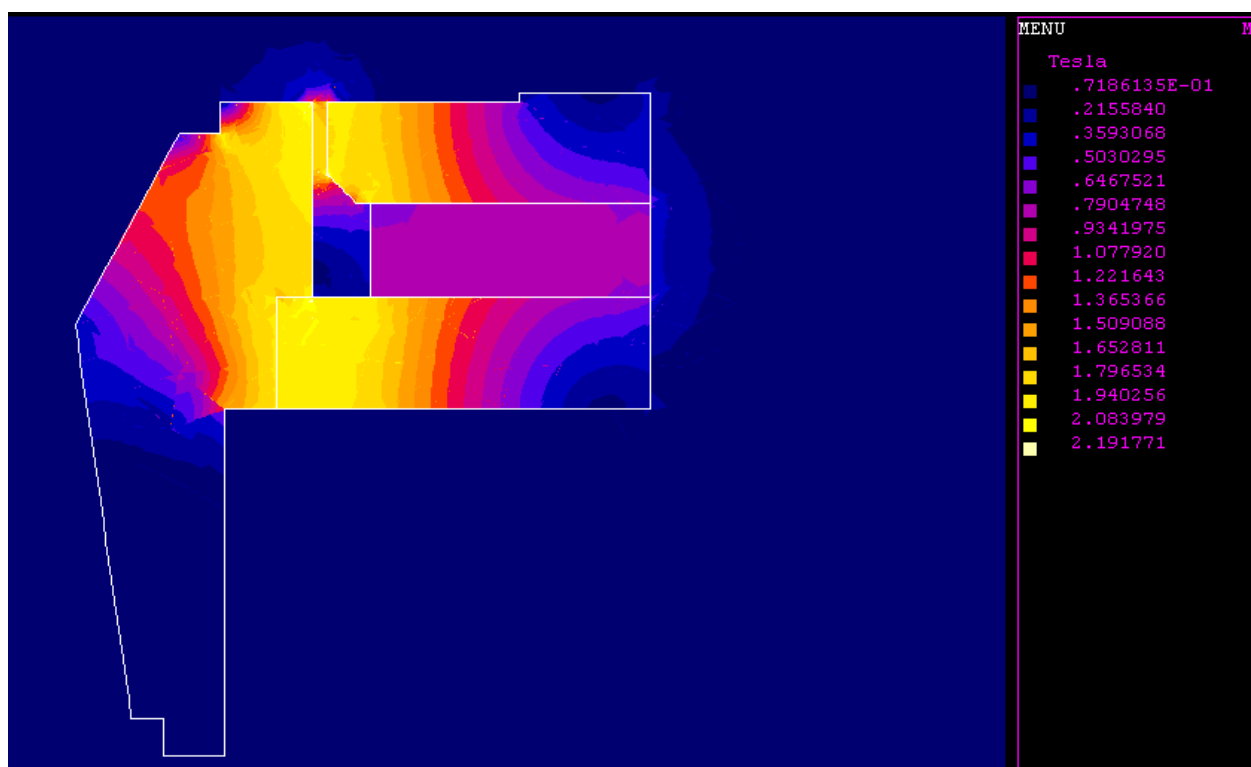
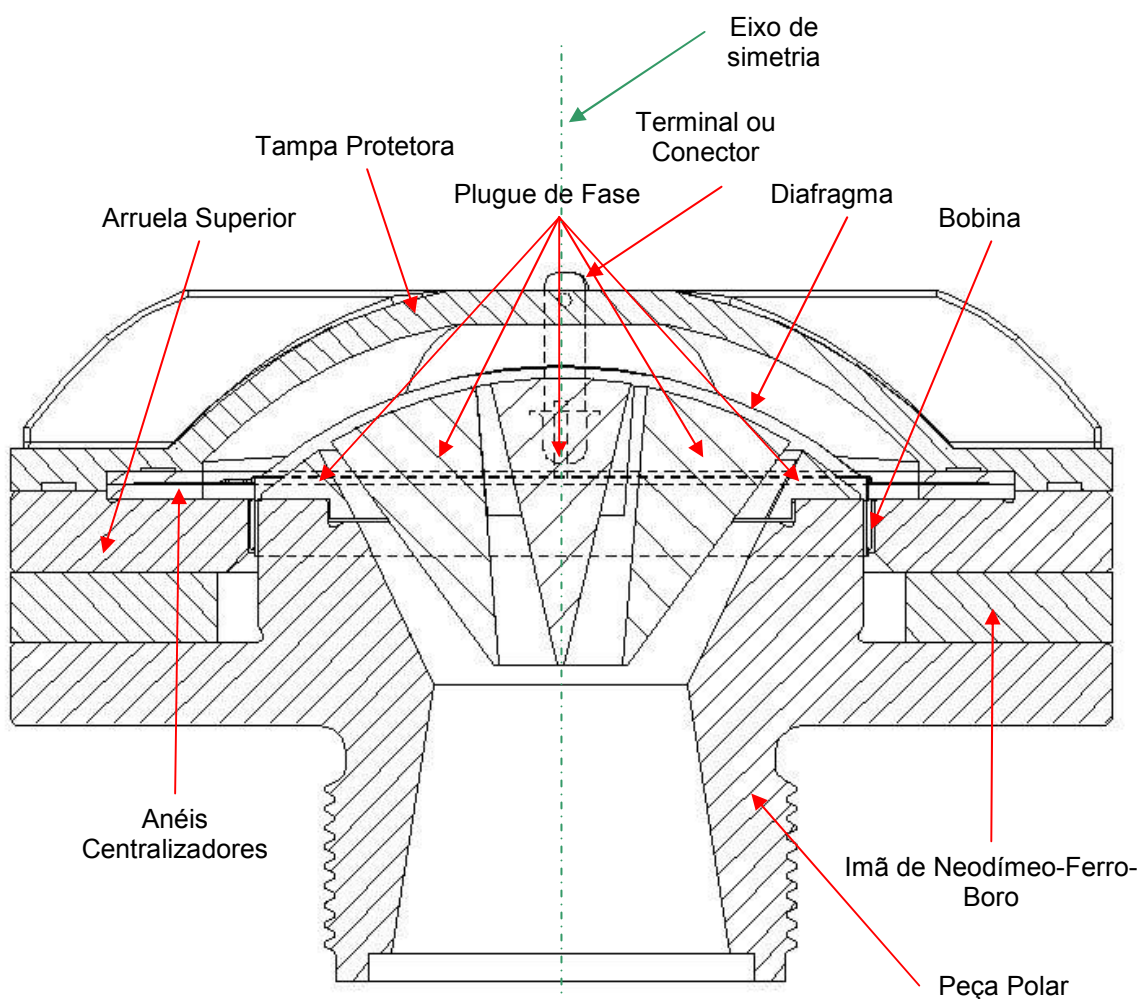


Figura 23 - Mapa de cores e linhas de campo sobrepostas do circuito magnético

## 7. Protótipo baseado na simulação por elementos finitos

Para comprovar o modelo simulado pelo método de elementos finitos, foi montado um protótipo para verificação, para isto foram elaborados os devidos desenhos para a confecção das peças. Na Figura 24 observa-se como ficará o protótipo, estão detalhados todos os componentes.



**Figura 24 - Desenho em corte do protótipo a ser montado**

## 8. Protótipo montado

Pode-se ver na Figura 25 o protótipo montado, consegue-se ver a arruela superior, o anel do ímã de Neodímio-Ferro-Boro e a peça polar, e sobre a peça polar está o plugue de fase.



**Figura 25 - Foto do protótipo montado**

## 9.Resultados dos testes

### 9.1 Medição da densidade de fluxo magnético no entreferro

O primeiro teste feito foi a medição da densidade de fluxo magnético no entreferro, para isto foi utilizado um Gaussmeter da Magnet-phisic que utiliza uma sonda da FWbell de efeito hall. Para a medição foi utilizado um aparato, onde consistia em um elevador manual, onde neste era acoplado um paquímetro e a sonda, desta forma podemos registrar o deslocamento pela intensidade de fluxo, pode-se ver o aparato montado na .

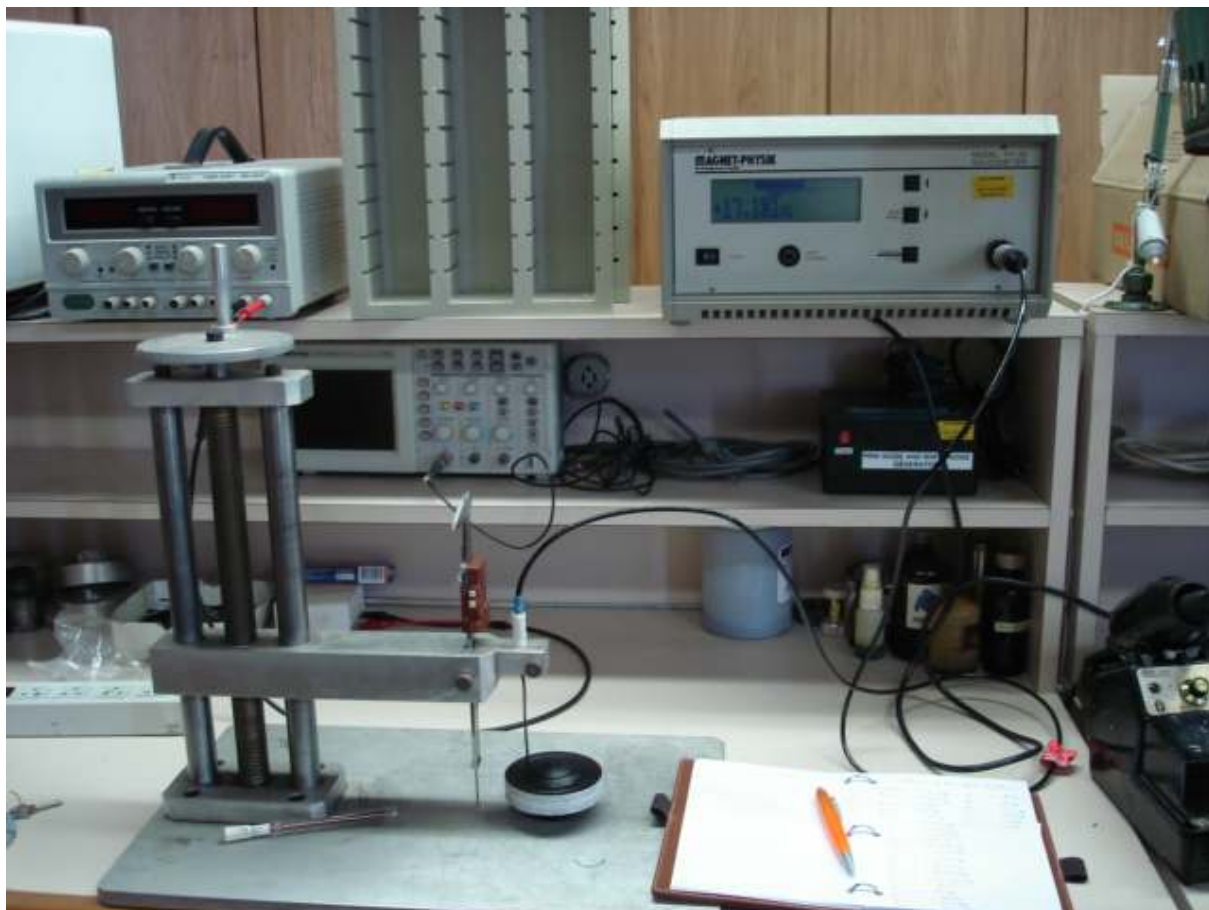
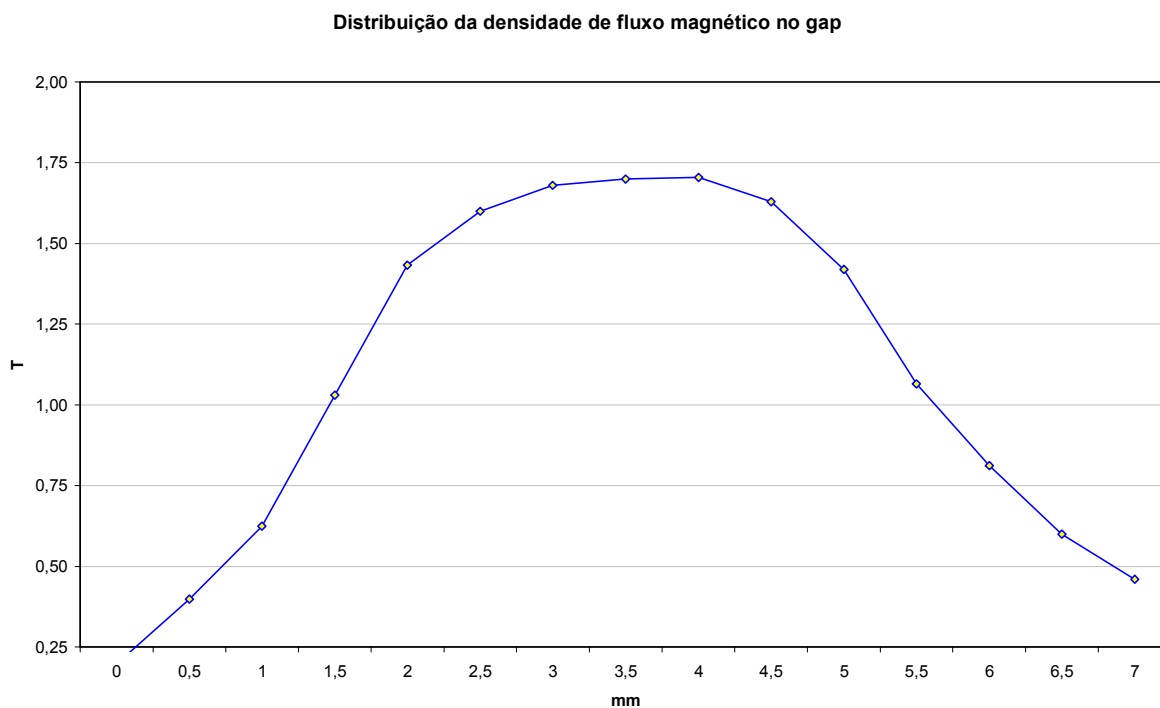


Figura 26 - Aparato montado para medição da densidade de fluxo magnético no entreferro

Com os pontos de medição conseguiu-se gerar um gráfico onde demonstra esta distribuição de fluxo magnético, pode-se ver na Figura 27, e verificamos que o ponto máximo medido foi 1,71T, aproximadamente no centro do gráfico.



**Figura 27 - <sup>3</sup>Gráfico da distribuição da densidade magnética medida no entreferro**

<sup>3</sup>Ver os dados em “Dados medidos no entreferro do driver de compressão” nos anexos

## 9.2 Medição da curva de resposta em frequência

Outro teste realizado é a curva de resposta em frequência, está é feita medindo-se o driver com um microfone de medição do tipo eletreto, em câmara anecóica, com uma corneta de referência acoplada ao driver e estando o microfone a 1m de distância da corneta, aplica-se o nível referente a 1Wrms (2,828Vrms@8Ω) e o equipamento utilizado para a medição é o LMS da empresa LinearX (www.linearx.com).

Pode-se ver a curva de resposta do protótipo na cor vermelha e a curva do produto em ferrite de Bário em azul na Figura 28.

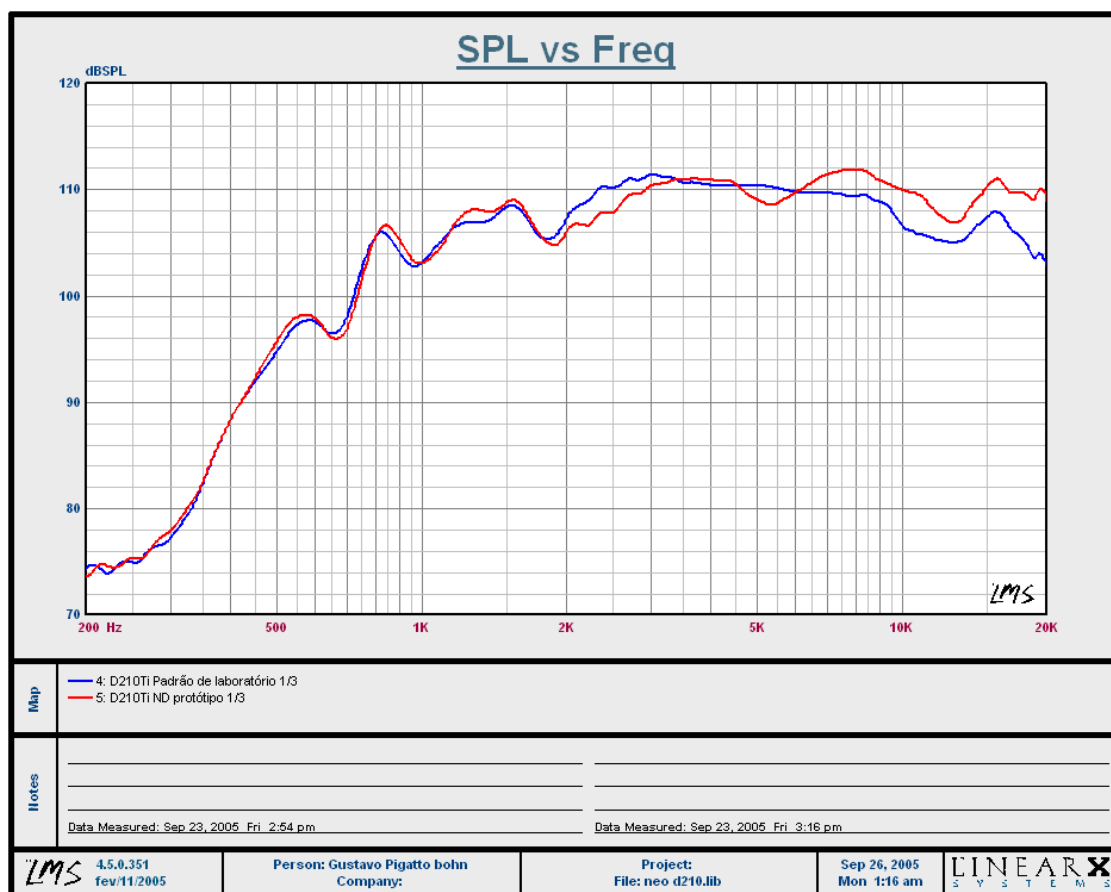


Figura 28 - Curva de resposta em frequência do protótipo versus o atual

## Conclusão

Com este trabalho, pode-se concluir que se conseguiu atingir os objetivos propostos. O peso final do driver ficou em 694g e o driver original em ferrite pesa 1730g com isto conseguimos uma redução de aproximadamente 60% do peso original o que constitui um ganho significativo se pensarmos em um grande sistema de som.

Nas medições podemos verificar que os valores obtidos pela forma analítica, numérica (MEF) e no protótipo montado não excederam 10% como se pode ver na Tabela 3

**Tabela 3 - Densidades de fluxo medidas e calculadas**

Método	Densidade de fluxo medido, pico máximo
Analítico	1,63T
Numérico (MEF)	1,75T
Protótipo	1,71

E observa-se que na curva de resposta em frequência o driver de Neodímio-Ferro-Boro foi ligeiramente superior em frequências acima de 8KHz, isto foi devido ao fato de ele possuir 0.11T a mais do que o driver convencional de ferrite de Bário.

## Bibliografia

Lorrain, P., Lorrain F.e Corson, D. Campos e Ondas Electromagnéticas, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2000.

Flores Filho, A.F., Imãs Permanentes de Terras Raras: Utilização Industrial, UFRGS, Brasil, 1998.

Silveira, M.A., Estudo de um Atuador Planar, Tese de Doutorado – UFRGS, Brasil, 2003.

Hayt, W.H., Jr., Eletromagnetismo, LTC, Brasil, 1983.

Paris, D.T. and Hurd, F., Basic Electromagnetic Theory, McGraw-Hill, 1969.

Kraus, J. D. and Carver, K. R., Electromagnetics, Japan, McGraw-Hill, 1973.

Landgraf, F. J. G. e Rodrigues, D. e Teixeira, J. C. , Imãs-Aplicações, Processos e Propriedades, IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Brasil, 2003.

Flux2D, Cedrat, Manual de Utilização, França, 1998

Dickson, V., Caixas Acústicas e Alto-Falantes, tradução Sette, Homero, H.Sheldon, Brasil, 1997.

Sette, H.S., Análise e síntese de Alto-Falantes e Caixas Acústicas, H.Sheldon, Brasil, 1996.

AES, Papers , Coleção de publicações, USA, 2003.

JASA, Papers , Coleção de publicações, USA



## Anexos

Editor's Note: This is the forty-first in a series of review and tutorial papers on various aspects of acoustics.

## Historical review of horns used for audience-type sound reproduction

John K. Hilliard

1511 Clear View Lane, Santa Ana, California 92705  
(Received 1 August 1975; revised 28 August 1975)

This paper reviews the history of horns used in loudspeaker systems for audience-type sound reproduction. It reviews the early pioneering work started around 1910 which used telephone-type transmitters before vacuum tube amplifiers were available. With the availability of amplifiers more powerful driver-type loudspeakers were developed to operate with exponential straight and folded horns. Sound motion pictures created a demand for higher quality, and higher-powered loudspeaker systems for both voice and music. The many stages of development of two-way loudspeaker systems are reviewed. The limitations of each stage of development before proceeding to the next improvement is discussed. Photographs of many early horns are included as well as the more recent types.

Subject Classification: [43]10.60, [43]85.60.

### INTRODUCTION

Horns must be ageless since they seem to be an essential part of the history of man. Animal horns were used in early stages of civilization for signaling and warning over great distances. Horns for hearing aids and musical instruments of the brass-wind types were also used in primitive life. An important characteristic of a horn is its ability to perform as an acoustic transformer or impedance converter to obtain maximum efficiency over a wide range of frequencies. Therefore, the concept of acoustical impedance, directivity, and signal to noise ratio has been known for a long, long time.

At the American Physical Society in 1914, A. G. Webster presented a paper on horns apparently unpublished. In 1917, in his publication *Electro-Acoustics*, Kennelly conceded priority to Webster on the impedance concept. Then, in 1919, A. G. Webster published a paper on the acoustical impedance and theory of horns.<sup>1</sup> During the ensuing years, many other authors have published papers on the horn theory.<sup>2-9</sup>

The value of impedance conversion was gradually recognized starting in 1910 with "The Story of the Magnavox," the work of E. S. Pridham, cofounder of Magnavox.<sup>10</sup> In 1915, he used the 22-in. horn of an Edison Amberola phonograph connected to his moving coil telephone receiver to transmit speech that could be heard two blocks away (Fig. 1). Many of these modified horns were used at the San Francisco City Hall on Christmas Eve in 1915 to address 50 000 people (Fig. 2). In these early years of use, it was also learned that the use of multiple loudspeakers caused phasing problems.

The telephone receiver was our early form of loudspeaker driver. With the advent of the crystal detector radio set, one of the first driver-horn combinations appeared in the form of a telephone receiver placed in what was then called a "tea cup" (Fig. 3). This provided at least 10 dB of useful low-frequency gain by better impedance match. It should be empha-

sized here that a horn is not an amplifier, but an acoustic transformer. Uniform radiation impedance over the desired bandwidth is needed. Uniform acoustical impedance is approached when the finite horn mouth diameter is equal to wavelength. Below this dimension, the impedance is largely reactive and only a small amount of acoustic radiation is available. For maximum efficiency, the driving force must meet a resistance instead of the inertia of the diaphragm.

The Western Electric Harding-type horn (Fig. 4) and the Morning Glory Horn (Fig. 5) used telephone receiver principles incorporated in drivers from 1917 to 1925. Then, in 1925, the Western Electric 555W-type moving coil driver was production developed and revolutionized sound reproduction in its use on a 11-ft folded horn (Fig. 6). High overall efficiency was the word and impedance conversion did it. The first phasing plug had arrived and Wentz and Thuras did it.<sup>11</sup> In the same period, Kellogg and Rice<sup>12</sup> made a fundamen-



FIG. 1. Edison Amberola phonograph horn connected to Pridham moving coil telephone receiver used to transmit speech that could be heard two blocks away.



FIG. 2. Modified Edison Amberola phonograph horn used at the San Francisco City Hall on Christmas Eve, 1915, to talk to 50 000 people.



FIG. 4. Western Electric-type Harding horns used in San Francisco civic auditorium on Armistice Day, 1921.

tal contribution with the dynamic cone-type loudspeaker which was also used to drive horns such as used by RCA Photophone. Electric phonographs and radio were now off to the great leap forward (Fig. 7).

The historic debut of Warner Brothers' vitaphone motion picture production *Don Juan* in 1926 was made possible by the efforts of the Western Electric Co. in providing loudspeaker systems including large folded horns and drivers capable of reproducing music to theater audiences. *The Jazz Singer* followed in October 1927, and made certain that silent pictures had come to the end of the road.

In 1929, large theaters with 5000 seats such as the Capitol Theater in New York were equipped with as many as eight horns with 32 555-type drivers (shown in Fig. 6) mounted behind a perforated projection screen. During the same period, Morning Glory Horns of the type shown in Fig. 5 were installed for public address purposes in Madison Square Garden, New York, and large outdoor arenas throughout the U. S. A. Ten-watt amplifiers were used as they were the most

powerful commercial amplifiers available.

#### 1. PHASING OF HORNS

Up until 1931, a plurality of folded and Morning Glory exponential horns were used. Each horn radiated the entire bandwidth. The inevitable overlapping of horn patterns caused many problems and both the folding and length of the horn restricted the uniform radiation of desirable high frequencies.

The 555 horn driver was limited to 5 W. Its diaphragm displacement was not adequate for the needed acoustic low-frequency power in sound effects and music. A theater-type "wide range" system was introduced in 1931 using a three-way system. (Fig. 8). Several 18-in. cone-type dynamic units were used on a flat baffle to 300 Hz, the folded horns from 300–3000 Hz, and the Western-Electric-type 596 horn tweeter from 3000 Hz up to the cutoff point of about 6000–7000 Hz. In 1932, Maxfield and Colledge cited the relatively poor phasing between acoustic centers on these three

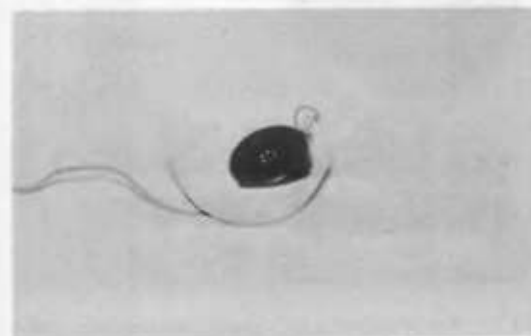


FIG. 3. Telephone receiver placed in a tea cup to act as a horn in early crystal detector radio sets.

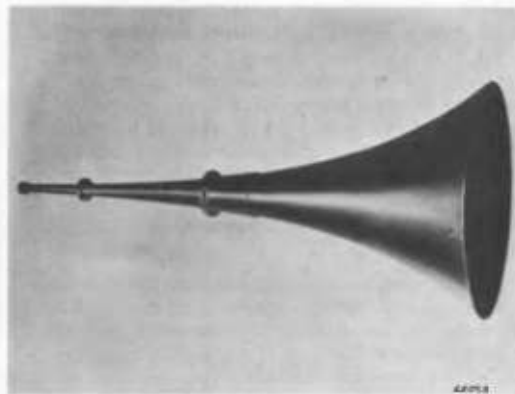


FIG. 5. Morning Glory-type horns used for sound reinforcement both indoors and outdoors beginning in 1923.



FIG. 6. Western Electric-type 12 A folded horn with 555-W-type dynamic driver unit. Used in early sound motion picture theaters beginning in 1926.

radically different acoustic path lengths. For a period of three years they "phased" these Western Electric systems.<sup>12</sup> This consisted of adjusting the relative acoustic centers so the phase was additive. They secured desirable results in many theaters but the general reaction of motion picture studio and theater sound engineers was not favorable. The three-way system had complicated distribution patterns because of the variety of transducers used. In 1935 the tweeters were removed and these theaters then operated with a two-way system.

## II. MULTICELL HORNS

The Bell Telephone Laboratories used a Multicell horn in what is generally called the Fletcher System and was probably the first demonstrated use of an integrated cluster of exponential horns driven from one driver.<sup>13</sup> (Fig. 9). The Fletcher System used a square configuration of  $4 \times 4$  cells, each with a mouth area of 64 sq. in. This horn system served as the prototype of a series of later designs. The minimum beamwidth occurs when the arc of the multicell horn

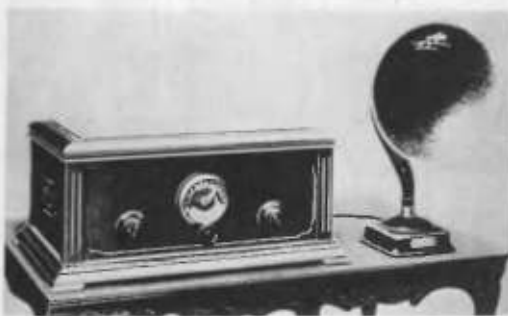


FIG. 7. Horns used on early radio sets beginning in 1922.

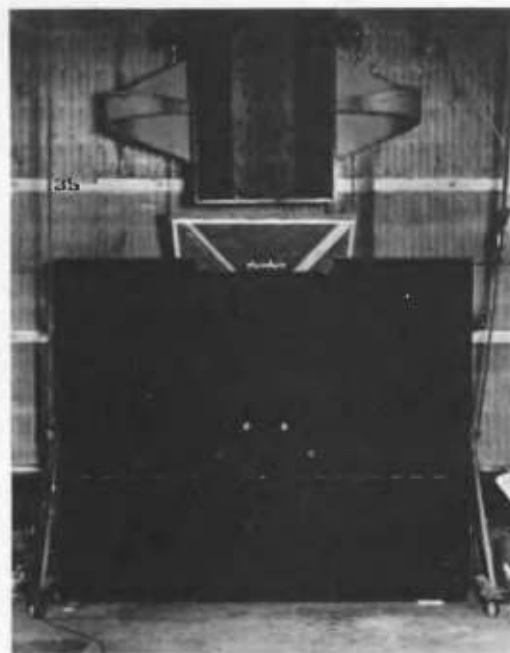


FIG. 8. Western Electric-type three-way wide-range theater loudspeakers first used in 1931. Lower baffle contained 18-in. cone-type dynamic speakers transmitting lower frequencies up to 300 Hz (first use of word "woofer"). Top large horn with double entry 300–4000 Hz. (first use of term "midrange horn"). Center-type 596 "tweeter"-type horns and drivers (first use of "tweeter"). Range—4000–16 000 Hz.

mouth approximates one wavelength. At the highest frequencies the directive pattern is broad depending upon the number of cells. In the Fletcher system, the square opening produced a  $70^\circ \times 70^\circ$  pattern and it was necessary to use two horns side by side to give the required angle of distribution for each channel. For theater application, a single multicell horn was desirable, and a family of horns having different vertical and horizontal patterns was developed in 1935, was standardized by the motion picture industry and are in current use.

The Fletcher System was made available to MGM studios in Culver City, California, after the Bell Telephone Laboratories Philadelphia-Washington, D.C. demonstration took place in 1933.<sup>14</sup> The motion picture industry desired to purchase a commercial model of the Fletcher system, but the Western Electric Company decided not to produce it.

In 1934, I was given the task of developing a theater loudspeaker system which would replace the then current systems made by Western Electric Company and RCA. We used the Fletcher System as a reference loudspeaker because its quality, efficiency, and frequency range were so superior to existing systems. Certain physical size and shapes were not practical

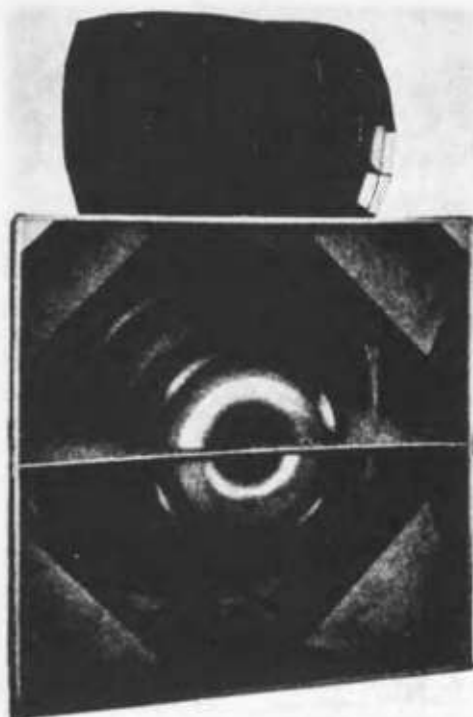


FIG. 9. Wentz-Thuras design of special loudspeakers developed for auditory perspective experiment in 1933. Known as the "Fletcher System" after Dr. Harvey Fletcher of Bell Telephone Laboratories.

for theater use and a new design was necessary.

Early in our work, an unusual experience was encountered. Eleanor Powell, at that time, was a famous tap dancing star in motion pictures. One day she was rehearsing on the music stage where our work was in progress. We monitored her taps on the Fletcher System and were surprised to hear two taps for each one of hers. We then monitored the taps on a single loudspeaker and the delayed tap on the Fletcher System was not present. We reproduced her tap on the Fletcher low-frequency unit—no echo. It then became obvious that there was an 8-ft difference in path length to the acoustic centers since the Fletcher folded low-frequency horn had a path length of 11 ft. We moved the high-frequency unit back 8 ft so that the diaphragms were at time zero. The echo or double tap was absent. This was a dramatic example of delay. We then moved the unit inch by inch until we first observed an echo. Depending upon the skill of experienced observers, a delay corresponding to a distance of 1 to 2 ft was the detectable point. A delay of 1 msec then became our criterion for future design, and is today the maximum permitted tolerance for high quality systems. It was also established that only one crossover should be used, and that it should occur in the octave

above 300 Hz. This point is sufficiently low in frequency so that the important part of the speech spectrum is on the high frequency unit. Higher crossover frequencies provide the same unpleasant quality as that of the three-way wide range system which was abandoned after 1936. The Academy of Motion Picture Arts and Sciences scientific award in 1936 for MGM system was the recognition of these design rules<sup>15</sup> (Fig. 10). I wish to express appreciation for valuable aid from Douglas Shearer, Harry Olson, John Volkmann, Bill Snow, and James B. Lansing on this project.

After several years of use in theaters, it was obvious that improved quality and distribution could be obtained by using a short low-frequency straight exponential horn with a lower cutoff frequency of 50 Hz. It has an acoustic path length of 36 in., which was the same as the high-frequency horn, so as to avoid a time delay between the low- and high-frequency horns (Fig. 11). This version is known as the Altec Voice of the Theater.<sup>16</sup>

### III. FOLDED HORNS

Folded horns have been used in early applications of loudspeakers, and where extended high-frequency propagation is not important. When the bend of a folded horn has a radius of curvature equal to the wavelength, reflections occur. For this reason a folded horn can be used only for narrow-band radiation and is not used under any circumstances where the highest quality is desired over a wide bandwidth.



FIG. 10. Shearer Metro Goldwyn Mayer loudspeaker system which received Academy of Motion Picture Arts and Sciences Technical Award in 1936. The low-frequency folded horn has 4-16-in. cone-type dynamic drivers with a range 50-500 Hz. Upper multicellular horn is driven by Lansing type 287 high frequency units with a range of 400-12 000 Hz. A 12 dB/octave dividing network is used with a crossover point at 500 Hz.

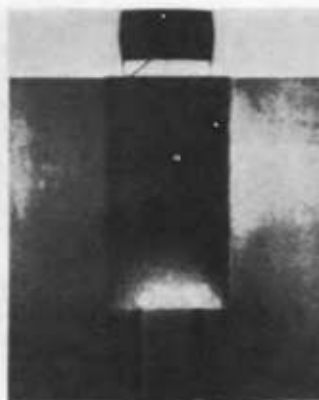


FIG. 11. Altec "Voice of the Theater"-type loudspeaker system in use after 1945 in motion picture theaters, large convention centers, arenas, and churches. The lower section is a straight exponential horn with 2-15-in. cone-type dynamic drivers. The upper multicellular horn is driven by Altec-type 288 drivers. This was the first use of permanent magnet-type drivers in theater-type systems. It uses a 12 dB/octave cross-over at 500 Hz.

#### IV. SHORT AND LONG THROW HORNS

In the earliest days of sound reinforcement these two terms, short and long throw horns, were in common use. The important distinction was that of directivity. The long throw horn was a trumpet or Morning Glory type of horn with a length of up to 6 ft and a bell diameter of 3 ft. (Fig. 5). This, but its geometry, produced a narrow beam in the speech frequency range and was effective for long throws or distances (several hundred feet). A short throw horn uses a 2-3 ft-long trumpet with an 18-in. bell and is used for distances less than 200 ft. It also has a larger angle of coverage because of the smaller mouth.

#### V. HORN CONSTRUCTION

The walls of horns have been discussed extensively by various workers throughout the years of use. That

which is excessive vibration to some may be acceptable to others. Movement of a horn wall extracts energy from the source. It produces dips in response. It acts as a secondary radiator to change the distribution pattern. Sometimes it produces buzzes or rattles. The purist wants none of these. The amateur does not appreciate the difference. Stiffness and mass are used to reduce the effect. Damping material coated on the outside walls is often used. Laminates are successfully used. Close spacing of braces is another beneficial aid to rigid walls. Septums at the face of the horn are also used for structural integrity. Bracing the walls of a horn is usually employed to improve stiffness rather than by increasing the weight of the wall. An empirical rule found to be adequate is that an unsupported area should be less than 1 sq. ft. to avoid energy loss in 1-in. thick plywood or equivalent material when used on low-frequency horns or boxes,

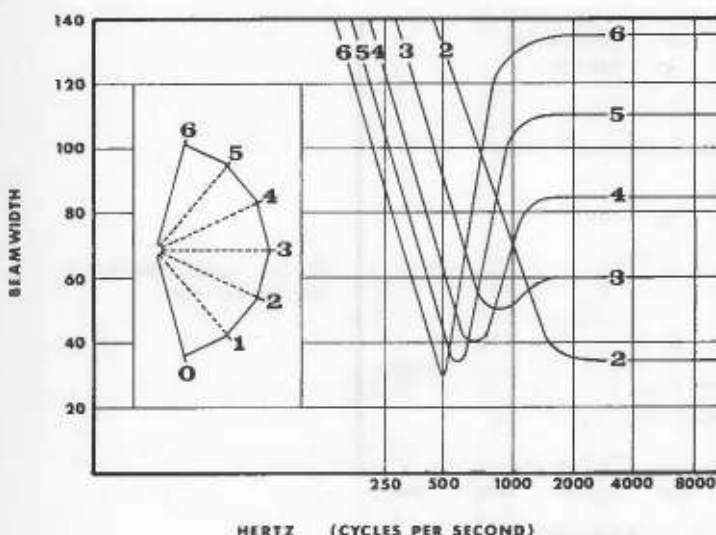


FIG. 12. Typical beamwidths of multicellular-type horns.





FIG. 13. A typical installation of two-way 500-Hz crossover loudspeaker systems used for sound reinforcement in athletic events and convention centers.

Multicell horns have been in extensive commercial use since 1938. They are used in theaters, sound reinforcements systems, warning systems and recording studio monitors. The distribution pattern is varied by the configuration of cells to achieve the required horizontal and vertical coverage. For large horizontal and minimum vertical coverage a typical horn is five cells wide and two cells high yielding a nominal  $90^\circ \times 40^\circ$  pattern. However, the pattern at frequencies near cluster cutoff vary over wide limits as shown in Fig. 12.

Combinations of multicellular horns with low-frequency horns are used in varying configurations for auditorium-type installations, in gymnasium score board combinations and in churches (Fig. 13).

Recent commercial use of sectorial horns in areas where maximum horizontal and limited vertical patterns are wanted, demonstrate improved distribution over its entire band as shown in Fig. 14. It can be

expected that for many applications the sectorial horn will replace the multicell type.

A maximized controlled directivity over a band of frequencies can be achieved with the use of a vertical stacked array of sectorial horns. Such an array provides a large ratio of horizontal to vertical radiation. It is especially effective at those frequencies which do not cause destructive interference. A typical array is shown in Fig. 15.

The work of Kock and Harvey documents the early published material on focusing devices designed to increase the directivity of acoustic transducers.<sup>17</sup> Applications of several types of acoustic lenses have been produced by the J. B. Lansing Company.<sup>18</sup> Typical horizontal plane directional patterns of a horn and diffracting lens made according to Kock and Harvey designs are shown in Fig. 16.

The lens materially increases the beamwidth over a

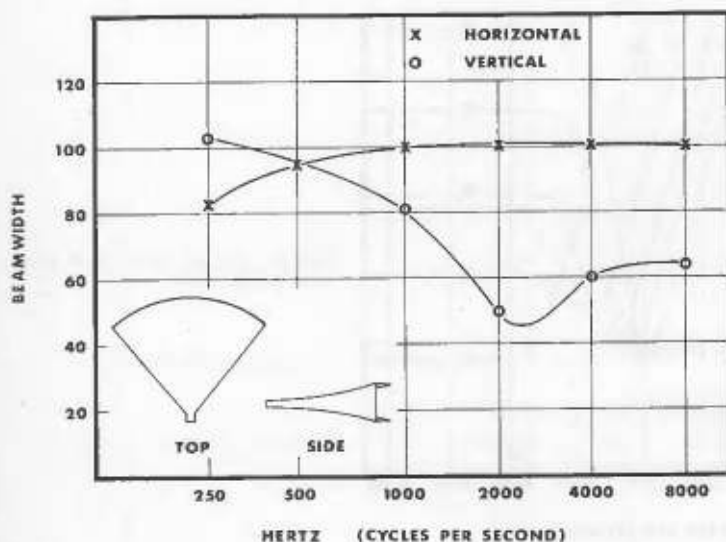


FIG. 14. Typical beamwidths of sectorial-type horns.



FIG. 15. Directional array of sectorial horns to provide limited vertical beamwidth and wide horizontal beamwidth in the frequency range above 500 Hz.

straight horn. However, more desirably uniform distribution patterns are obtained with sectorial horns. Lens applications are largely restricted to home use as compared to large indoor and outdoor systems where finite exponential horns have large-scale acceptance.

Fins have been used in large exponential horns for various purposes. In a sectorial horn shown in Fig. 14 the fins are used for structural support to avoid vibration. Frederick V. Hunt has suggested they may be valuable in avoiding cross modes near the mouth in large horns. My experience indicates that no noticeable improvement in distribution is achieved with fins. Egg-crate-type construction has also been suggested and used, but commercial application is very limited and seems to offer no great advantage.

Olson<sup>19</sup> has published the acoustical properties of multiple flare exponential horns with as many as three rates of flare. Multiple flare horns are of limited use and are not generally available. Experience over a long period of time with many configurations of horns, has led to the conclusion that high-frequency horns should be as short as possible for a given low-frequency cut-off. This requires a larger throat than has been used in the past. A driver unit must therefore be designed to incorporate a matching mouth. The short horn provides decreased distortion and an extension of high-frequency response over a more uniform angle of coverage.

The overall electrical to acoustical efficiency on horn-type systems approaches 20%. This is a very high efficiency when one considers that a typical modern home entertainment speaker system is only 0.1%–1% efficient. Utilizing a horn-type system, less amplifier power is required for theaters of 1000 seats to generate the same loudness as would be produced in an average living room with conventional cone-type speaker systems.

This historical review of horns represents the author's personal experience and the availability of photos and documents. It is certainly not complete and many individuals will probably be able to add to it.

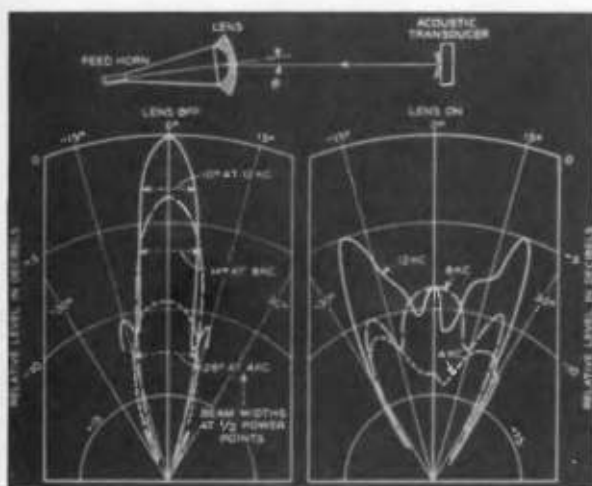


FIG. 16. Horizontal plane directional patterns of the horn: left, the horn alone; and right, the combination of horn and diffusing lens.

- <sup>1</sup>A. G. Webster, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 5, 275 (1919).
- <sup>2</sup>H. P. Olson, *Elements of Acoustical Engineering* (Van Nostrand, Princeton, NJ, 1940), p. 212.
- <sup>3</sup>G. W. Stewart and R. B. Lindsay, *Acoustics* (Van Nostrand, Princeton, NJ, 1930), Chap. 6.
- <sup>4</sup>A. L. Thuras, R. T. Jenkins, and H. T. O'Neil, *J. Acoust. Soc. Am.* 6, 173 (1935).
- <sup>5</sup>F. Massa, *Electron.* 10(4), 30 (1937).
- <sup>6</sup>G. W. Stewart, *Phys. Rev.* 16, 313 (1920).
- <sup>7</sup>J. Slepian and C. R. Hanna, *J. Am. Inst. Elec. Eng.* 43, 393 (1924).
- <sup>8</sup>I. B. Crandall, *Vibrating Systems and Sound* (Van Nostrand, Princeton, NJ, 1926).
- <sup>9</sup>K. Osman Mawardi, *J. Acoust. Soc. Am.* 21, 323 (1949).
- <sup>10</sup>E. S. Pridam, "The Story of the Magnavox" (Magnavox Co. Publ., 11 Sept. 1947).
- <sup>11</sup>E. C. Wente and A. L. Thuras, *Bell Syst. Tech. J.* 7(1), 1940 (1928).
- <sup>12</sup>J. P. Maxfield and C. Flannigan, "Wide Range Reproduction in Theaters," *Soc. Motion Pict. Eng.* XXVI, 67 (Jan. 1936).
- <sup>13</sup>E. C. Wente, U. S. Patent 1,992,268 (26 Feb. 1935).
- <sup>14</sup>E. C. Wente and A. L. Thuras, "Loud-Speakers and Microphones for Auditory Perspective," *Elect. Eng.* 17-24 (Jan. 1934).
- <sup>15</sup>J. K. Hilliard, "A Study of Theater Loud-Speakers and the Resultant Development of the Shearer Two Way Horn System," *J. SMPTE* 45-60 (July 1926).
- <sup>16</sup>J. B. Lansing and J. K. Hilliard, "An Improved Loud-Speaker System for Theaters," *J. Soc. Motion Pic. Eng.* 15, 339-349 (Nov. 1945).
- <sup>17</sup>W. E. Kock and F. K. Harvey, *J. Acoust. Soc. Am.* 21, 471-481 (1949).
- <sup>18</sup>J. Frayne and B. Locanthi, *J. Soc. Motion Pic. Telev. Eng.* 63(3), 82 (1954).
- <sup>19</sup>H. F. Olson, *Elements of Acoustical Engineering* (Van Nostrand, Princeton, NJ, 1940), p. 238.
- <sup>20</sup>C. W. Rice and E. W. Kellogg, "Hornless Loud Speaker," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.* 44, 461-475 (Apr. 1925).



Editor's Note: This is the forty-sixth in a series of review and tutorial papers on various aspects of acoustics.

## Electroacoustics to 1940

John K. Hilliard

1511 Clear View Lane, Santa Ana, California 92705  
(Received 25 May 1976)

The historical context of acoustical and motional impedance was conceived and applied on a large scale before the Acoustical Society was founded in 1929. It seems appropriate at this time to review for the Society some of the people and their developments which contributed to the advancement of transducers by application of the impedance concept.

PACS numbers: 43.10.Ln, 43.88.-p, 01.65.+g

### I. THE IMPEDANCE CONCEPT

About 100 years ago, Heaviside introduced the term "impedance." In 1912, the term "motional impedance" was first introduced by A. E. Kennelly and G. W. Pierce, who were studying the variation in impedance with frequency for a telephone receiver and discovered that the electrical impedance could be influenced by the coupled mechanical system.<sup>1</sup>

A substantial amount of information concerning the electromechanical behavior of a transducer can be deduced from the analysis of impedance measurements made at the terminals of the transducer. When the mechanical system is blocked so that it cannot move, the electrical impedance and its variation with frequency can be measured directly. The "motional impedance" can then be found after making similar measurements when the mechanical system is allowed to vibrate without restraint and by subtracting the former from the latter at each frequency of measurement (Fig. 1).

### II. TELEPHONE TRANSDUCERS

In 1910, E. S. Pridham,<sup>2</sup> co-founder of the Magnavox Company, realized that high sensitivity in a telephone receiver was required for long distance telephone and radio receivers since vacuum tubes were not then available. The moving coil telephone instruments provided a usable sensitivity and many Navy vessels used them in quantities between 1913 and 1918. Their use in telephones, however, was restricted because of their weight and bulk. A probable first application of a telephone receiver to produce a loudspeaker is described by Pridham. A dynamic telephone receiver was placed in the end of a large horn. Speech and music were reproduced and could be heard over a very considerable distance. This was probably the first public address system application (1915) (Fig. 2). The Western Electric Co. produced public address systems between 1918 and 1923 which used telephone receivers as horn drivers<sup>3</sup> (Fig. 3).

The pull and release of an iron armature as controlled by the current in the windings of an electromagnet represent the oldest technique in the world of electrical communication. It is still in extended use. These moving-armature devices have been in almost universal use in the telephone-receiver field since the inception of telephones<sup>4</sup> (Fig. 4). The basic feature of the moving armature is that the tractive force always tends to close the air gap in the magnetic field. The patent of

Baldwin in 1908 represents a basic improvement in headphones in which a light balanced armature was linked to a thin, mica diaphragm. These headphones for many years were regarded as the ultimate by radio pioneers.

### III. CARBON MICROPHONE

Few electrical devices are as widely used as the carbon microphone. There has been much speculation in regard to its mode of action. In telephone laboratories, the problem has been regarded as perennial. In converting acoustical energy into electrical energy, it magnifies or amplifies the energy by a factor of 1000 (30 dB). Other microphones require separate amplifiers. In spite of the fact that electrical amplification has been available for more than 50 years, the carbon microphone, after 100 years of use, still is the main source of transduction and apparently will be so for several more years. At the present time, there are more than 350 million in use throughout the world. The ability of a loose contact of carbon granules to transmit speech was discovered by Emile Berliner in this country. Bell's original telephone was electromagnetic in principle.<sup>5</sup> The carbon microphone has been called the world's most expensive loose connection<sup>6</sup> (Fig. 5).

### IV. LOUDSPEAKERS

A. G. Webster is credited with the first publication on the theory of horns.<sup>7</sup> Around 1920, it was realized

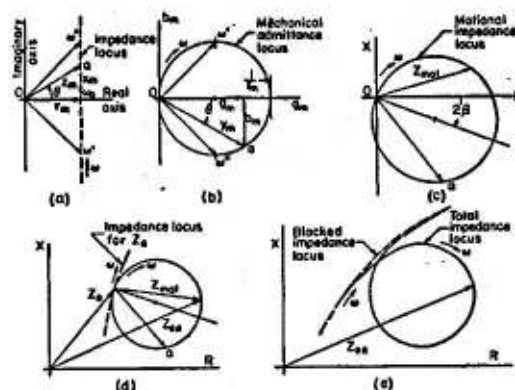


FIG. 1. Stages in the evolution of the vector impedance locus.



FIG. 2. A moving-coil telephone receiver used as a loudspeaker driver on a very large horn by Pridham in 1915.

the radiation resistance and the radiated sound power of a loudspeaker is uniform when the motion of the system is primarily controlled by mass reactance; hence, the design placed the resonance at the lowest frequency.

Back radiation has been used for extended frequency range in both loudspeakers and microphones. A telephone receiver designed by Louis Steinberger in 1919 had four small tubes which connected the space behind the diaphragm to the volume of air enclosed in the ear cap. The basic disclosure of the bass reflex principle came in a patent by A. L. Thuras issued in 1932. This patent outlined its effectiveness in increasing the low-frequency response in both a loudspeaker and a dynamic microphone (Fig. 6).

Harry L. Duncan was issued a patent in 1923 for constructing a paper cone and its corrugated rim in one piece. This patent became the now standard practice for cone-type direct radiation loudspeakers.

Norman H. Ricker filed a patent in 1922, which was granted in 1932, of the two large wide angle cones cemented base-to-base and driven by a moving-armature



FIG. 3. Western Electric moving armature type telephone receiver mounted on large horns for public address system in San Francisco in 1931.

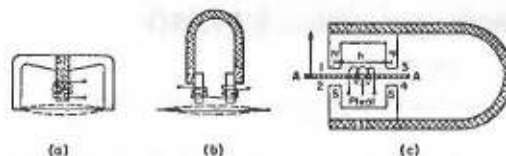


FIG. 4. Three typical moving-armature transducers: (a) monopolar (b) bipolar, and (c) balanced armature.

ture device at the center. Such a device was developed by the Western Electric Co. as the 540 AW loudspeaking telephone<sup>3</sup> (Fig. 7). It was used for broadcast monitoring and home receivers during the period of 1924–1928. The modern "moving-coil" direct radiator loudspeaker has not been changed in any important aspect since its basic mode of operation was established by Rieger, Wentz, and, especially, Rice and Kellogg. Reliance is still placed on mass control of the motion of the diaphragm to secure substantially uniform response through a broadband of midrange frequencies.

Early in the 1920's, C. W. Rice and E. W. Kellogg collaborated in making the best possible hornless loudspeaker. The General Electric Co. allowed them to be free of patents or novelty during the development. A very important paper published by them in 1925<sup>4</sup> described in a precise way the existing state of the art in this field as well as a review of prior work by others, not yet available in published patent specifications. This hornless loudspeaker (Fig. 8) was so good that it has had almost universal use in home radio receivers from the 1920's up to date.

A historical first is the Radiola Loudspeaker, Model 104, which combined the dynamic speaker with a 1-W amplifier. (Today we have 50–200 W in the home.)

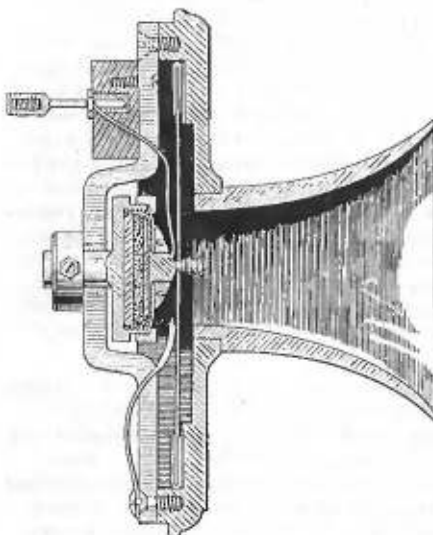


FIG. 5. Solid-back carbon microphone invented by White in 1890.

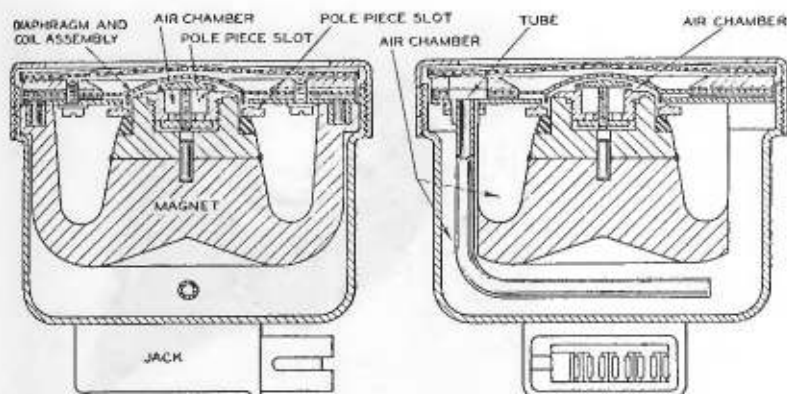


FIG. 6. Bass reflex principle patented by Thuras in 1932, as used in Western Electric type 618 dynamic microphone.

The instant acceptance of this loudspeaker was based on two simple physical principles: (1) that sound radiation produces a mechanical resistance to the diaphragm vibration when mounted in a baffle, and (2) mass control for wide frequency range.

The best known, and maybe the initial use of electro-network analogs as a guide to the design of a mechanical system by Maxfield and Harrison,<sup>10</sup> resulted in the great improvement in phonograph recording and reproduction (1925).

The outstanding advantage of electrical recording soon led to its universal instant application in the phonograph industry. In 1930, G. W. Stewart and R. B. Lindsay<sup>11</sup> published a book on the theory of acoustics which provided a much needed comprehensive text for students in the developing broad field of acoustics.

Following the development of electrical filters in 1920, G. W. Stewart devised an acoustical low-pass filter, the theory of which parallels that of the electrical low pass filter. Minton and Ringel proposed a two-way or dual loudspeaker system in which electrical networks were used to divide the frequency spectrum in two parts.

In the early 1920's, it was realized that loudspeakers for sound reinforcement and sound motion pictures must have high efficiency. Unfortunately, at this time only a few electrical watts were available. Since an efficiency of 25% or greater was required to produce the necessary sound levels, the Western Electric 555-W moving coil driver of Wenthe and Thuras<sup>12</sup> (Fig. 9), coupled to a large horn, provided the transducer that made possible large area audience coverage (Fig. 10). Impedance conversion, by creating a high loading factor (ratio of diaphragm area to throat area), made possible an efficiency approaching 30% on a production basis. The historic debut of Warner Bros. Vitaphone motion picture production *Don Juan* in 1926 was made possible by the efforts of many Bell Laboratories scientists.

H. F. Olson<sup>13</sup> published information in 1931 on a directional baffle or large throat horn loudspeaker for use in sound Motion Picture theaters, reinforcement

systems, and Naval applications.

Wenthe and Thuras, later in 1933,<sup>14</sup> again provided a dynamic horn driver having the same efficiency, higher power, and improved uniform loading over a wide range of frequencies. It was coupled to a multicellular horn so that this wide band of frequencies could be radiated uniformly over an angle of 70°. This was the historic Philadelphia to Washington stereo demonstration.

In 1935, Hilliard<sup>15</sup> advanced the work of Wenthe and Thuras by providing a design of theater loudspeaker systems that could be mass produced, and it became the world standard theater system now installed in 80% of the theaters in the U.S.A. This system provided a

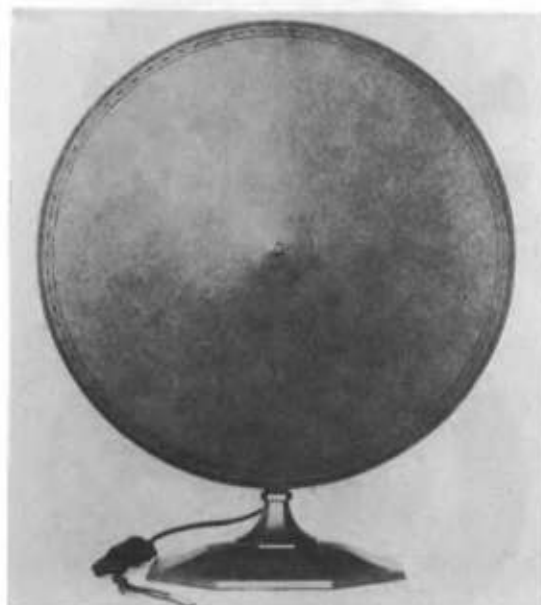


FIG. 7. Western Electric 540AW loudspeaking telephone (loadspeaker) used for broadcast monitors and home receivers during 1923-1928.

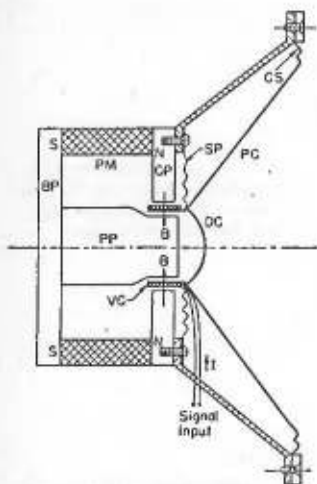


FIG. 8. Typical structural features of a loudspeaker of the moving-coil direct radiator type.

selectable configuration of multicellular horns so that each theater or auditorium could have a tailor-made distribution pattern for wide area coverage and used

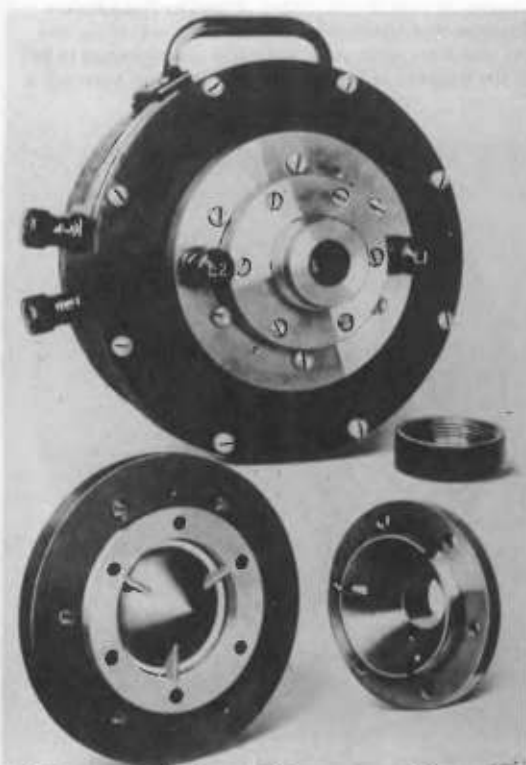


FIG. 9. Western Electric type 555-W moving-coil driver designed by Wente and Thuras.

J. Acoust. Soc. Am., Vol. 61, No. 2, February 1977



FIG. 10. 555-W receiver attached to 70-Hz cutoff coiled horn used in first sound motion picture theaters.

large area dynamic low-frequency cone speakers in large horns having a low-frequency cut of around 50 Hz (Fig. 11).

#### V. LOUDSPEAKER DIVIDING NETWORKS

J. K. Hilliard and H. R. Kimball<sup>10</sup> published the first design information on various configurations of loudspeaker dividing networks in 1926. These networks also used the concept of impedance to secure the desired frequency crossover results and minimum phase shift. At this time, the maximum delay between low- and high-frequency units was established as 1 msec. When sounds from these two-way units arrived with greater delay, the ear easily detected an echo. Studies on these theater sound systems provided early essential information on controlling directivity for both low- and high-frequency radiators so as to fit a needed distribution pattern in large theaters, auditoriums, and outdoor reproduction.



FIG. 11. First theater loudspeaker system using large low-frequency horn and multicell high-frequency horn. Given technical Oscar award by Academy of Motion Picture Arts and Sciences in 1936.



FIG. 12. Battery of Western Electric type 618 dynamic microphones used in radio and recording studios beginning in 1930.

## VI. MICROPHONES

The history of microphones used for instrumentation is to be presented by Harry B. Miller in the following paper. In addition, certain individuals have been responsible for improving microphones used in the field of recording, broadcasting, and speech reinforcement. The early commercial microphones other than the carbon type start with the condenser microphone of Wente which was used in phonograph, motion picture recording, and broadcast work between 1924 and 1930 (Fig. 12). Jones and Giles<sup>17</sup> developed a high-output, high-quality dynamic microphone which had application beginning in 1930.<sup>18</sup> H. F. Olson<sup>19</sup> developed the Ribbon Microphone, commercialized in 1931. At that time, RCA decided to call it the Velocity Microphone because the response corresponds to the particle velocity in the sound wave (Fig. 13). The RCA 77A<sup>19</sup> Unidirectional Microphone was commercialized in 1933 (Fig. 14). It consisted of a velocity section with a



FIG. 13. RCA-44 ribbon microphone designed by H. F. Olson and first used in 1931.



FIG. 14. RCA-77A unidirectional microphone with cardioid pattern designed by H. F. Olson and first used in 1933.

ribbon transducer and a pressure section with a ribbon transducer. W. R. Harry and R. N. Marshall<sup>20</sup> developed a cardioid microphone and provided selected patterns of cardioid shapes (Fig. 15). Beginning in 1940, condenser microphones of miniature size again became popular as well as numerous miniature dynamic microphones.

## VII. ELECTROSTATIC DEVICES

Electrostatic mechanisms of electromechanical systems have established a long if not distinguished career through the pioneering period of almost every branch of the transducer art.

The electrostatic loudspeaker is the outgrowth of nearly two centuries of pioneering in many branches of transducer development. However, it has failed to gain the hoped for practical application because of the high voltage required, the air gap dimension, and other factors restricting the diaphragm to small amplitudes.<sup>21</sup>

Wente's condenser microphone<sup>22</sup> of 1917 represents the first transducer design in which sensitivity was traded for uniformity of response. The advent of the vacuum tube for amplification allowed him to gain back the sensitivity that was available only with in-band resonance before this time.

Both Edison and Dolbear described complete telephone systems using electrostatic transducers for both transmitting and receiving functions. Dolbear used a liquid dielectric between the two plates. Just as he was starting his first public demonstration in 1878, he noticed the liquid had leaked out of the transmitter. In desperation, he started to talk and was surprised to find out that the transmitter was working as well as it ever did. He then realized that the dielectric could be air.



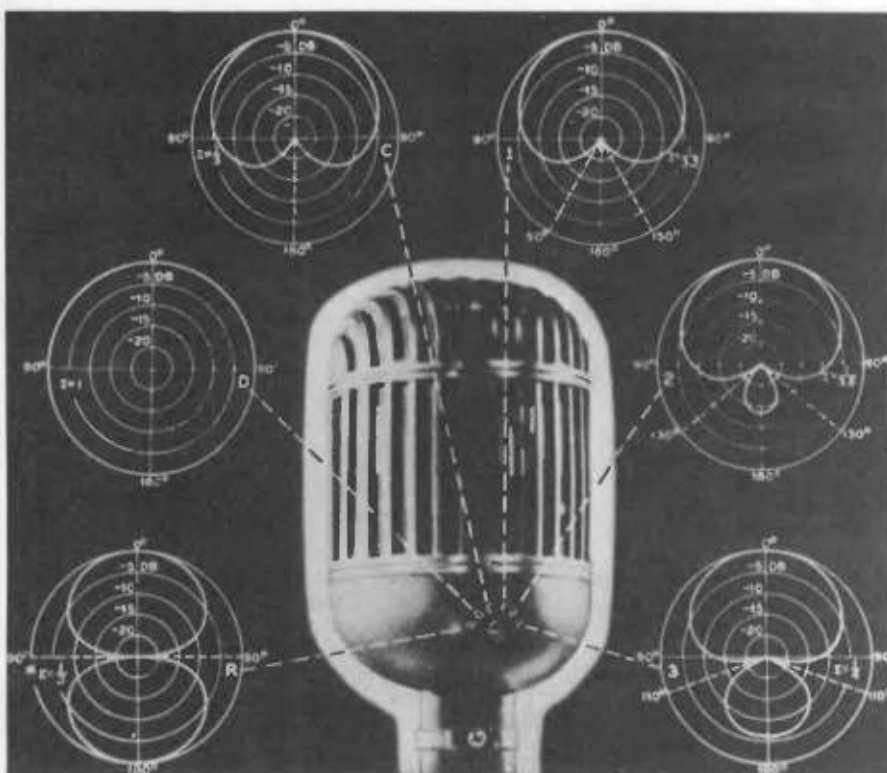


FIG. 15. Western Electric six-way directional microphone designed by Harry and Marshall in 1939.

### VIII. PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS

Application of piezoelectricity in the U. S. resulted from the work of Langevin during the first World War. Professor W. G. Cady<sup>23</sup> was the leading worker with others at the New London Navy Experimental Station. Cady also opened the field of application of quartz crystals to stabilize self-excited vacuum-tube oscillators. Underwater acoustic signaling sustained a gradual increase in application during the period up to 1940, after which time World War II provided the necessity to expand its development to a large scale.

### IX. PERIOD OF 1930 TO 1940

The wax cutter design of Maxfield and Harrison opened the field for the use of electroacoustic transducers for the recording and reproduction of sound for both sound pictures and home phonographs.

The Western Electric 4-A phonograph pickup became a pattern of design. RCA and others designed and supplied magnetic pickups for general use.

In 1931, the "hill and dale" or vertical recording system was released by the Western Electric Company for transcription and broadcast use. This 33½ RPM record had a playing time of 30 min so that one record would supply a half-hour broadcast program. It was

used extensively also for wired music. After 1940, 33½ RPM lateral records were initiated by the Columbia Record Company and RCA and the vertical system was abandoned. Later, magnetic tape became dominant.

In 1934, Harry F. Olson<sup>24</sup> published information on a wide-range cone loudspeaker in which the driving system was sectionalized with compliances separating the individual masses so that a uniform response to 10 000 Hz could be achieved. In 1936, Olson and Hackley published information on a combination horn and direct radiator.

M. Weil, in a patent issued in 1931, appears to be the first to point out that the common intersection of the floor and the walls at the corner of a room could perform the function of a horn. Later, Klipsch<sup>25</sup> provided a design of a practical corner horn for high quality reproduction in the home. It was patented in 1940.

### X. SUMMARY

The choice of limiting this review to the period ending in 1940 was not difficult on the basis that this period included practically all of the fundamental electroacoustic achievements. Since that time, it appears that most advancement has resulted from better materials and

techniques of assembly. The basic method of transduction has not changed. The impedance concept provided a tool for design rather than using the cut and try method.

- <sup>1</sup>A. E. Kennelly and G. W. Pierce, "The Impedance of Telephone Receivers As Affected by The Motion of Their Diaphragms," *Proc. Acad. Arts Sci.* 48, 13-151 (September 1912).
- <sup>2</sup>E. S. Pridham, Magnavox Co. (private correspondence).
- <sup>3</sup>I. M. Green and J. P. Maxfield, "Public Address Systems," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.* 42, 64-75 (1923).
- <sup>4</sup>H. A. Fredricks, "The Development of a Microphone," *J. Acoust. Soc. Am.* 3, S25(A) (1931).
- <sup>5</sup>Alexander Graham Bell, "Researches in Telephony," *Proc. Am. Acad. Arts Sci.* 12, 1-10 (1877).
- <sup>6</sup>F. S. Goucher, "The Carbon Microphone: An Account of Some Researches Bearing on Its Action," *Bell Sys. Tech. J.*, 163-170 (April 1934).
- <sup>7</sup>A. G. Webster, "Acoustical Impedance and The Theory of Horns and The Phonograph," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 275-282 (1919).
- <sup>8</sup>Bulletin T-750, Western Electric Company (540 AW loudspeaker).
- <sup>9</sup>C. W. Rice and E. W. Kellogg, "Notes on the Development of a New Hornless Loudspeaker," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.* 44, 461 (April 1925).
- <sup>10</sup>J. P. Maxfield and H. C. Harrison, "Method of High Quality Recording and Reproducing Music and Speech Based on Telephone Research," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.* 45, 334-343 (February 1926).
- <sup>11</sup>G. W. Stewart and R. B. Lindsay, *Acoustics* (Van Nostrand, New York, 1930).
- <sup>12</sup>E. C. Wente and A. L. Thuras, "A High Efficiency Receiver of Large Power Capacity for Horn Type Loudspeakers," *Bell Syst. Tech. J.* (January 1928).
- <sup>13</sup>H. F. Olson, "A New High Efficiency Theater Loudspeaker of the Directional Baffle Type," *J. Acoust. Soc. Am.* 2, 485 (1931).
- <sup>14</sup>"Symposium on Auditory Perspective," *Bell Syst. Tech. J.* 13, 239 (April 1934).
- <sup>15</sup>J. K. Hilliard, "Study of Theater Loud Speakers and the Resultant Development of the Shearer Two-way Horn System," *J. Soc. Mot. Pict. Eng.* 27, 61-673 (July 1936).
- <sup>16</sup>J. K. Hilliard and H. R. Kimball, "Dividing Networks for Loudspeaker Systems," *J. Soc. Mot. Pict. Eng.* 27, 61-73 (July 1936).
- <sup>17</sup>W. C. Jones and L. W. Giles, "A Moving Coil Microphone for High Quality Sound Reproduction," *J. Soc. Mot. Pict. Eng.* 17, 977-993 (December 1931).
- <sup>18</sup>H. F. Olson, "The Ribbon Microphone," *J. Soc. Mot. Pict. Eng.* 16, 695-708 (June 1931).
- <sup>19</sup>H. F. Olson, "A Unidirectional Microphone," *J. Acoust. Soc. Am.* 3, 315 (1932).
- <sup>20</sup>R. N. Marshall and W. R. Harry, "Cardioid Directional Microphone," *J. Soc. Mot. Pict. Eng.* 27, 45-60 (July 1936).
- <sup>21</sup>F. V. Hart, *Electroacoustics* (Harvard University, Cambridge, MA, 1934).
- <sup>22</sup>E. C. Wente, "A Condenser as a Uniformly Sensitive Instrument for the Absolute Measurement of Sound Intensity," *Phys. Rev.* 10, 39-63 (July 1917).
- <sup>23</sup>W. C. Cady, "The Piezo-electric Resonator," *Phys. Rev.* 17, 531(A) (April 1921).
- <sup>24</sup>H. F. Olson, "A New Cone Loudspeaker for High Fidelity Sound Reproduction," *Proc. Inst. Rad. Eng.* 22, 33-54 (January 1934).
- <sup>25</sup>Paul W. Klipsch, "A Low Frequency Horn of Small Dimensions," *J. Acoust. Soc. Am.* 13, 137-144 (October 1941).

Dados medidos no entreferro do driver de compressão

l (mm)	B (T)
0	0,20
0,5	0,40
1	0,62
1,5	1,03
2	1,43
2,5	1,60
3	1,68
3,5	1,70
4	1,71
4,5	1,63
5	1,42
5,5	1,07
6	0,81
6,5	0,60
7	0,46



Tabela que apresenta os pontos do cálculo analítico

x	y	2HmLm	lt	ld	lg	B
0	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,000
0,0001	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,003
0,0002	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,002
0,0003	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,002
0,0004	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,003
0,0005	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,000
0,0006	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,003
0,0007	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,002
0,0008	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,003
0,0009	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,004
0,001	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,001
0,0011	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,001
0,0012	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,005
0,0013	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,018
0,0014	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,036
0,0015	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,065
0,0016	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,135
0,0017	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,281
0,0018	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,518
0,0019	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,816
0,002	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,113
0,0021	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,348
0,0022	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,494
0,0023	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,566
0,0024	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,597
0,0025	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,613
0,0026	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,624
0,0027	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,630
0,0028	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,630
0,0029	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,629
0,003	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,629
0,0031	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,630
0,0032	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,631
0,0033	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,631
0,0034	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,630
0,0035	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,630
0,0036	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,630
0,0037	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,631
0,0038	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,631
0,0039	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,631
0,004	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,630
0,0041	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,630
0,0042	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,630
0,0043	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,631
0,0044	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,631
0,0045	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,630
0,0046	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,629
0,0047	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,629

0,0048	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,630
0,0049	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,630
0,005	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,624
0,0051	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,613
0,0052	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,597
0,0053	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,566
0,0054	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,494
0,0055	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,348
0,0056	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	1,113
0,0057	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,816
0,0058	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,518
0,0059	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,281
0,006	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,135
0,0061	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,065
0,0062	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,036
0,0063	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,018
0,0064	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,005
0,0065	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,001
0,0066	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,001
0,0067	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,004
0,0068	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,003
0,0069	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,002
0,007	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,003
0,0071	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,000
0,0072	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,003
0,0073	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,002
0,0074	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,002
0,0075	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,003
0,0076	0,0004	4151,59	0,0076	0,0019	0,0008	0,000

Tabela de valores do imã de Neodímio-Ferro-Boro

**NEO-H Series ( Max. Working Temperature: 120 °C )**

Material Code	Residual Flux Density Br [ $\frac{KG}{T}$ ]	Coercive Force [ $\frac{KOe}{KA/m}$ ]		Max. Energy Product (BH)max [ $\frac{MGOe}{KJ/m^3}$ ]	Temp. Coeff. ( %/ °C )		Density ( g /cm <sup>3</sup> )
		bHc	iHc		$\alpha_{Br}$	$\alpha_{iHc}$	
<b>N27H</b>	10.0-10.8	10.5	16	25-28	-0.11	-0.58	7.45-7.55
	1.00-1.08	836	1273	199-223			
<b>N30H</b>	10.8-11.3	10.5	16	28-31	-0.11	-0.58	7.45-7.55
	1.08-1.13	836	1273	223-247			
<b>N33H</b>	11.3-11.7	10.5	16	30-33	-0.11	-0.58	7.45-7.55
	1.13-1.17	836	1273	239-263			
<b>N35H</b>	11.7-12.1	10.5	16	33-36	-0.11	-0.58	7.45-7.55
	1.17-1.21	836	1273	263-287			
<b>N38H</b>	12.1-12.5	10.5	16	36-39	-0.11	-0.58	7.45-7.55
	1.21-1.25	836	1273	287-310			
<b>N40H</b>	12.4-12.8	10.5	16	38-41	-0.11	-0.58	7.45-7.55
	1.24-1.28	836	1273	304-328			
<b>N42H</b>	12.8-13.2	10.5	17	40-43	-0.11	-0.58	7.45-7.55
	1.28-1.32	836	1353	318-342			