**Análise e Síntese de Circuitos Combinacionais de uma Única Saída**

# Adriano Soares Rodrigues e Matheus Vidal de Menezes

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

{sadrianorod, matheusvidaldemenezes}@gmail.com

**Resumo**

O presente trabalho estuda experimentalmente

**Palavras Chaves:**

***Abstract***

This paper studies, experimentally,

**Keywords:**

1. **Introdução**

No início do século XX John Ambrose Fleming criou a primeira um dispositivo que alavancou a eletrônica e o rumo do desenvolvimento tecnológico como possibilitar a criação do rádio e até de televisores. As válvulas termiônicas consistem basicamente por um invólucro de vidro, metal ou cerâmica a vácuo ou algum tipo de gás, com vários elementos metálicos internos chamados de anodo, catodo, grade e filamento conforme retratado na Figura 1.

Após o advento das válvulas termiónicas foram desenvolvidos os transístores, representado na Figura 2, que são basicamente semicondutores capazes de fazer a mesma função de uma válvula, controlar o fluxo de corrente, entretanto sem gerar tanto calor, ser menor e mais econômico, viabilizando assim o mundo que vivemos hoje além de substituir seu antecessor, consequentemente ocasionando o fim da produção das válvulas em larga escala. É importante salientar também que com o progresso tecnológico dos transístores criou-se a famosa família de circuitos integrados TTL, *Transistor-Transistor Logic*, responsáveis pelo desenvolvimento dos computadores pessoais e as portas lógicas, que são circuitos transistorizados.

Diante deste breve contexto histórico o objetivo da primeira prática laboratorial de EEA-21 Circuitos Digitais mostra-se de grande importância por tratar da familiarização e aprender sobre a utilização das portas lógicas estudadas teoricamente e aplicadas via *software*, onde foi utilizado o *Quartus* *13.01* , para a criação de circuitos digitais possibilitando a capacitando e o entendimento para a criação de circuitos básicos como detector de Fibonacci ou até mesmo o funcionamento de um Multiplexador.

1. **Objetivo**
2. **Fundamentação Teórica**

**III.1. Ondas Sonoras – Mecânica Analítica**

Visando a exploração de conceitos que remontam à Mecânica Analítica e devido ao fato da simplicidade na determinação da velocidade de saída de água pelo furo no tubo por dinâmica clássica, optou-se determinar a equação de uma onda sonora por tal teoria, em vez de utilizá-la para o cálculo da velocidade da água, evento que traz à tona o tratamento delicado de vínculos não holônomos. Isto, porque devido ao escoamento de água, as linhas de corrente comportam-se diferente e, se antes, sem furo a pressão somente dependia da profundidade, com o furo há, de fato, dependência da pressão em x, principalmente quando se analisa pontos perto do furo.

Disso resulta que, nesta seção, propõe-se determinar a equação da onda sonora, por meio da Mecânica Analítica. Para tanto, sabe-se que a propagação do som se dá em forma de onda mecânica longitudinal. O som através de um fluido possui energia cinética comumente por [1]:

(1)

Embora a expressão da energia cinética seja conhecida de imediato, a da energia potencial é um pouco diferente. Em geral, a transmissão de som se dá adiabaticamente [1].

(2)

Onde   é o volume de gás com é a constante de Poisson do gás, A é a área da seção transversal do tubo - que é constante e é o comprimento parcial de gás. Em pressão ambiente , isso se torna:

(3)

Onde  e  são o volume e o comprimento de uma parcela de gás sob pressão e temperatura ambiente. Assim, unindo esses resultados, tem-se:

(4)

*i.e.*, a pressão é inversamente proporcional ao volume elevado a gama ou, alternativamente, inversamente proporcional ao comprimento da parcela de gás elevado a gama.

Para calcular a energia potencial em uma parcela de gás, considera-se uma parcela de gás em isolamento, onde se permite que seu comprimento x se torne muito longo. Então, calcula-se a energia necessária para comprimir o gás para fazer o seu comprimento igual a :

(5)

Então,

(6)

Vale também definir a energia potencial que se usa aqui, como mostrado na Eq.(4) menos uma energia de referência, como a energia potencial quando a pressão da parcela é igual a . Por outro lado, este termo de energia de referência não sobreviveria à etapa de diferenciação na equação de Lagrange e, portanto, no final, não faz diferença para a equação final. Isso é típico de energias potenciais: geralmente podemos escolher a referência, ou seja, adicionar uma constante arbitrária, sem afetar o resultado dos cálculos.

Além disso, precisa-se da densidade de energia potencial por unidade , semelhante a e . Essa densidade de energia potencial é dada por:

(7)

onde é o comprimento de uma parcela de gás cujo comprimento à pressão ambiente é . Além disso, é definido como . Então, o Lagrangiano se torna:

(8)

Além disso, a equação de movimento pode ser obtida por (8):

(9)

Então, substituindo a Eq. (7) na Eq. (8) e utilizando a expansão de Taylor, obtém-se uma solução da série de potência de cossenoides. Dado que os termos de ordem superior (potência maiores ou iguais a 2), só se fazem necessário para o modelamento de ondas de choque – o que foge ao escopo do projeto, então linearizando em cossenoides e fazendo a consideração conveniente que e fase inicial nula, tem-se finalmente que [1]:

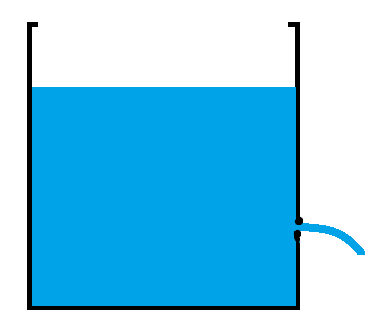
(10)

**III.2. Velocidade de Saída de Água**

Para determinar a descida no nível de água em função do tempo, utilizou-se o Princípio de Bernoulli, considerando a água como um líquido incompressível.

(11)

Para a situação:



Y

------------------------

------------------------

H

Figura 1. Figura ilustrativa da situação de um escoamento de água por um furo lateral de um recipiente cilíndrico. Na Figura, A: altura do nível de água. B: por onde sai a água.

Aplicando o Princípio de Bernoulli para os pontos A e B, tem-se:

(12)

Dado que:



Segue que:

(13)

Mas para um qualquer maior que zero:

(14)

Resolvendo a EDO, chega-se em:

(15)

**III.3. Interferência e Onda Resultante**

Considerando as variáveis definidas acima, a equação da onda progressiva para a onda gerada na abertura do tubo é dada por [1]:

(16)

Em um tubo, a diferença de fase entre a onda que se propaga até final do tubo e retorna até o início e a onda que acaba de ser emitida na abertura é dada pelo dobro de . Isso é explicado pelo fato de que representa a diferença de fase adquirida por uma onda, devido puramente à distância percorrida em [1].

(17)

Assim, a equação da onda progressiva para a segunda onda (refletida no fundo do tubo, pela água) fica:

(18)

Dessa forma, para determinar o comportamento da onda na entrada do tubo, necessita-se somar as funções de onda, pois há o estabelecimento de uma onda estacionária oriunda da interferência das duas ondas iniciais: . Logo,

(19)

Simplificando a expressão, tem-se:

(20)

Observe que a Eq. 20 define uma onda estacionária. Por exemplo, para amplitude máxima de oscilação, *i.e.*, , tem-se que o comprimento – entre a superfície d’água e a extremidade aberta – no qual a onda estacionária se estabelece é dado por:

, com (21)

Como se deseja analisar o comportamento da onda apenas na entrada do tubo, usa-se e se obtém:

(22)

Para o experimento, define-se, algumas grandezas para utilizar a equação de ondas progressivas:



Substituindo os dados, chega-se em:

(23)

1. **Método Experimental**

**IV.1. Materiais usados**

Para a aquisição de dados foram utilizados um tubo de acrílico transparente aberto de de comprimento com dois furos cobertos por duas peças plásticas móveis e com a presença de uma escala métrica, fita adesiva, uma rolha de cortiça, um fone de ouvido com microfone da Samsung, um celular ASUS Zenfone 4 ZE554KL, um *buzzer* piezoelétrico, um Arduino Genuino Uno e um béquer de .

Para realização da simulação do modelo teórico e para gerar um gráfico interativo foi utilizado o *software* Wolfram Mathematica 9.0. Por fim, para tratamento dos dados experimentais, foi utilizado os *softwares* Audacity 2.2.2 e *MATLAB* R2018a.

**IV.2. Descrição do Experimento**

**IV.2.1. Obtenção dos Dados Experimentais**

Para iniciar a aquisição de dados, o aparato experimental foi montado.

Inicialmente, preparou-se o tubo para receber a água que seria utilizada durante a aquisição de dados, para isso utilizou-se a rolha de cortiça para tampar o lado onde se encontrava o 0 da escala métrica, em seguida, utilizando a fita adesiva, vedou-se totalmente o furo mais afastado da origem da escala e vedou-se, utilizando a fita, metade do furo mais próximo da origem da escala para que o tempo do experimento fosse aumentado, aumentando a quantidade de dados obtidos, pois a vazão da água seria reduzida ao obstruir metade do caminho de saída dela.

Em seguida, devido a necessidade da utilização de água no experimento, o aparato foi montado em local aberto, onde a água poderia escorrer sem causar maiores problemas. Isso, de modo que para finalizar os preparativos em relação ao tubo de acrílico, ele foi fixado em uma parede do local com a fita adesiva, para que a angulação – de 90º - com a horizontal se mantivesse constante durante toda a realização do experimento.

Uma vez realizados os preparativos em relação ao tubo sonoro, foram alocados os emissores e receptores de ondas sonoras. Inicialmente, o *buzzer*, conectado ao Arduino, que por sua vez estava conectado por um cabo USB a um computador, iniciou a emissão das ondas sonoras na frequência de devido ao início da execução do código disponível na seção A.1 do Anexo A. Ele foi alocado na parte superior do tubo sonoro. Em seguida, o microfone do fone de ouvido foi conectado ao celular, que por sua vez estava realizando a função de gravador, e alocado na parte superior do tubo, mas logo abaixo do *buzzer* e de forma que apontasse para o interior do tubo para que obtivesse apenas os dados gerados pelo experimento.

Vale salientar que para que o experimento pudesse ser iniciado, o béquer foi preenchido com água da torneira. Assim, antes de ser iniciado o enchimento do tubo, o gravador iniciou sua recepção de dados, daí a água foi movida de forma cuidadosa para que os aparelhos eletrônicos não fossem atingidos. Enquanto isso, o furo semi-vedado se encontrava fechado pela peça de plástico móvel. Assim que a marca de da escala ser atingida pela água, a peça de plástico foi movida, e o experimento iniciado.

Após a água atingir a altura do furo mais próximo da origem, e o experimento ser finalizado, o gravador parou de realizar a aquisição de dados. Vale ressaltar que para melhor reconhecimento, no áudio, de onde se inicia e onde se finaliza o experimento, sinais sonoros produzidos por um estalar de dedos próximo ao microfone foram utilizados para realizar essas demarcações no início, com a abertura do furo semi-vedado e no final, com a altura da coluna d’água se igualando a altura do furo mais próximo da origem da escala métrica.

**IV.2.2. Tratamento dos Dados Experimentais**

Os dados obtidos pelo microfone do fone de ouvido e pelo celular Asus foram enviados em formato .mp3 via Bluetooth para um computador com o *software* Audacity instalado. O arquivo foi importado para esse programa, que funciona como manipulador de arquivos sonoros. Por meio dele, após a edição para retirar trechos da gravação original que não pertence a realização do experimento, delimitado pelos estalares de dedos, um arquivo com os dados de amplitude sonora pelo tempo de experimento foi exportado num arquivo de texto. Vale dizer que os dados de amplitude se dão em escala linear, diferente da usual logarítmica (dB).

Em posse do arquivo com os dados, tentou-se obter o gráfico de amplitude por tempo, mas devido à alta taxa de aquisição de dados – – foi necessário o tratamento dos dados para que pudessem ser interpretados. Tendo em vista isso, foi utilizado o *software* MATLAB R2018a, no qual o tratamento foi realizado e a partir do qual os gráficos dos dados experimentais foram gerados. Esse tratamento teve como objetivo diminuir a densidade de dados e tornar o gráfico legível para interpretação do resultado experimental, para isso, foi repetido várias vezes o processo de eliminação de metade dos dados – isso foi feito considerando que cada dado era referenciado por um índice de um vetor que armazena todos os dados. Os dados com índice par foram eliminados a cada vez que o processo foi repetido e antes do recomeço do processo, os dados eram deslocados para não haver espaço vazio no vetor de dados. Após isso, houve redução de mais de 500000 dados para pouco mais de 2000. Outra manipulação realizada com os dados para melhor entendimento dos resultados obtidos foi o cálculo de desvio do resultado experimental do esperado pelo modelo teórico. Ao realizar esse cálculo, notou-se a presença de algumas unidades de pontos *outliers* que foram removidos utilizando o método de Hampel [2]. O código utilizado está disponível na seção A.2 do Anexo A.

**IV.2.3. Simulação do Modelo Teórico**

Decidido o modelo teórico a ser utilizado no experimento, uma simulação considerando as equações do modelo e as condições de contorno fornecidas pelos aparatos instrumentais utilizados – comprimento do tubo de 90 cm, por exemplo – foi realizada com o intuito de fornecer resultados esperados a ser comparados com os resultados experimentais.

Para realização da simulação, o *software* Wolfram Mathematica 9.0 foi utilizado. Com a declaração das equações do modelo adotado e especificação das condições de contorno, um gráfico de amplitude por tempo foi gerado que representa o resultado esperado pelo experimento realizado.

Ainda, um gráfico interativo foi gerado utilizando a função *manipulate* do programa, nele a frequência do emissor poderia ser modificada e o resultado dessa modificação poderia ser vista rapidamente no gráfico interativo.

Os códigos geradores dos gráficos do resultado teórico e do gráfico interativo se encontram na seção A.3 do Anexo A.

1. **Resultados e Discussão**

Esperava-se observar o fenômeno de ressonância no tubo. Previu-se correspondência com o estudo de ondas estacionárias, *i.e.*, que a amplitude da onda resultante – medida na extremidade superior do tubo – varie periodicamente ao passo que a água escorre inferiormente. Inclusive, conforme o previsto, a velocidade de saída da água diminuiu com o tempo – dado que a altura de líquido diminui – logo foi verificado que a frequência de variação da amplitude do som percebido diminui à medida que a água deixou o tubo.

O experimento que durou aproximadamente 12,47s demonstrou bons resultados em termos de aproximação com o modelo teórico. Isso pode ser observado inicialmente quando se justapões os comportamentos da amplitude da onda sonora para o modelo teórico e para o experimental. Note na Figura 2, é notável maior predominância da cor laranja do que cor azul, o que implica afirmar uma boa – pelo menos em uma análise rápida – justaposição da curva laranja (experimental) à curva azul (teórica).

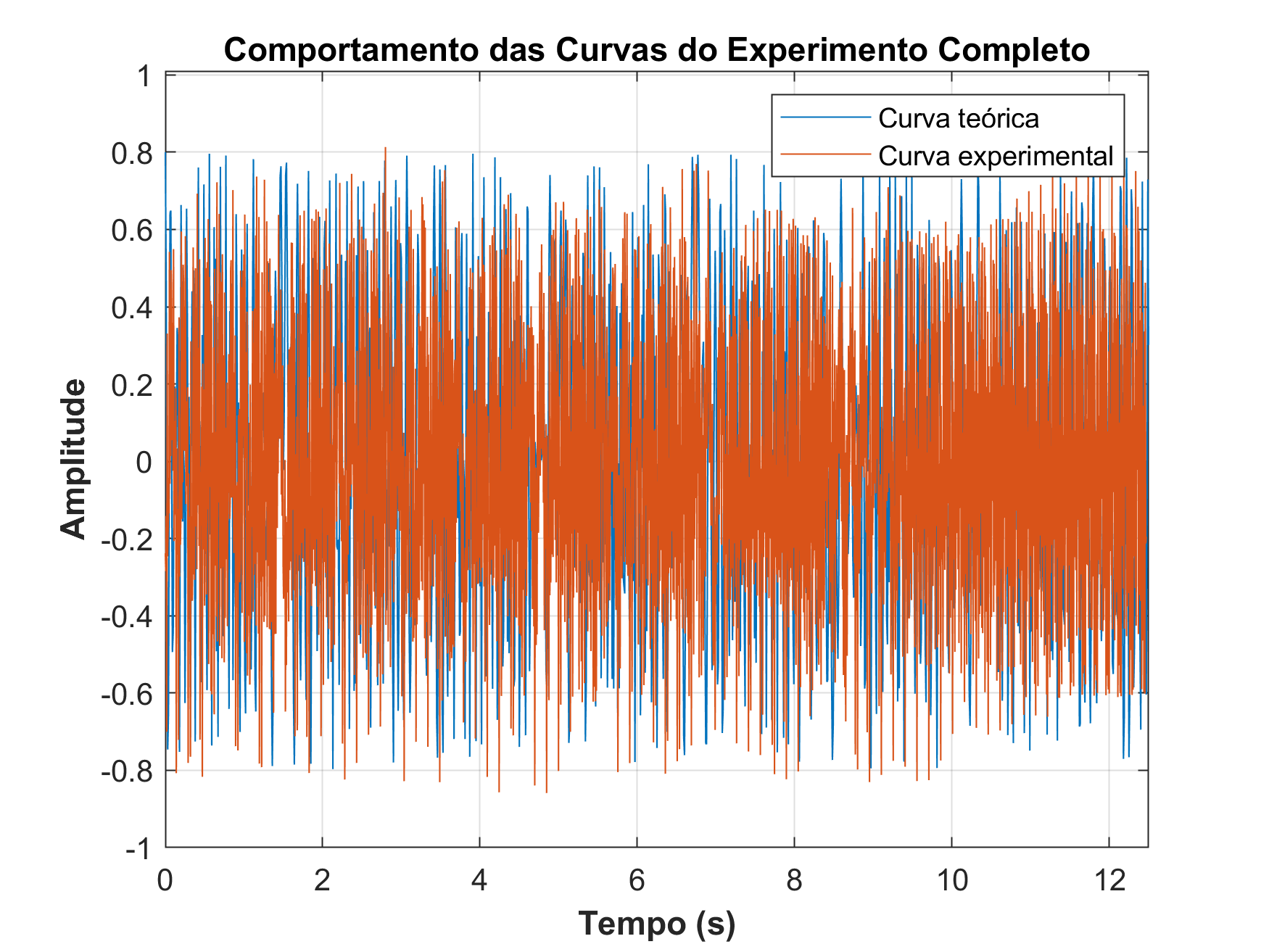


Figura 2. Comportamento da amplitude da onda em curvas teórica (azul) e experimental (laranja).

Para melhor clareza de comparação no comportamento entre amplitude e tempo da onda sonora, foi feito uma ampliação até 1s apenas.

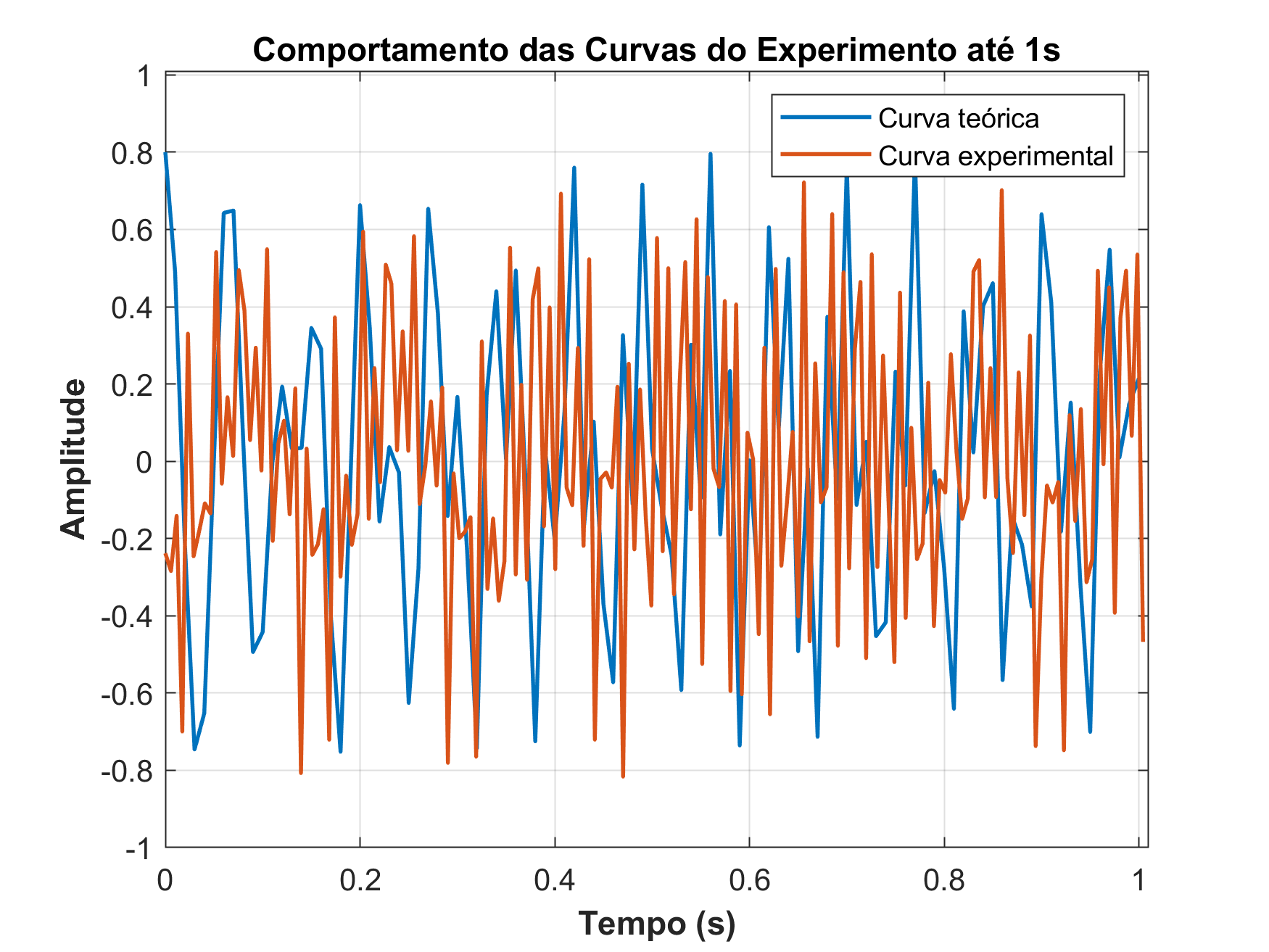


Figura 3. Comportamento da amplitude da onda em curvas teórica e experimental, porém ampliados para apenas até 1s de duração de experimento.

Visualmente nos gráficos da Figura 3, notou-se que houve algumas diferenças, porém estas são minoria na amostra de resultados, *i.e.*, a cor laranja prevalece, de modo que foi possível enxergar os resultados do experimento com mais clareza.

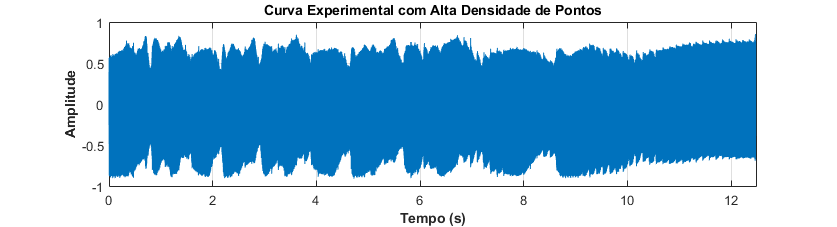


Figura 4. Curva experimental, sem tratamento de dados, primária com alta densidade de pontos devido à alta taxa de amostragem do microfone utilizado .

A Figura 4 apresenta os dados experimentais obtidos pelo microfone sem tratamento no MATLAB. Percebe-se que há uma alta densidade de informações, o que dificulta a interpretação dos resultados. No entanto, retira-se do gráfico que, no começo, a amplitude variou com uma determinada frequência, a qual foi reduzida à medida que a água fluiu pelo furo. Isso se explica pelo fato de que, em quanto a coluna de água diminuía de altura, a diferença de pressão entre o topo da água e o furo também se reduzia. Dessa forma, a velocidade de escoamento do líquido decresceu, até zerar.

Além disso, a frequência de 1000 Hz utilizada possui um conjunto de comprimentos no tubo aberto que causam máximos e mínimos de interferência [3]. A passagem, ao longo do tempo, por esses modos de vibração está evidenciada na Figura 4, através dos “gomos” criados pela variação harmônica da amplitude da onda estacionária resultante. Os comprimentos de tubo correspondentes aos modos de vibração para uma dada frequência são dados pela Eq. (21).

Assim, como consequência disso, os “gomos”, *i.e.*, máximos no gráfico da Figura 4 são alargados à medida que o tempo passa, pois, a variação do comprimento do tubo é reduzida quando se aproxima ao final do experimento. O tempo entre dois máximos foi, portanto, aumentado com o escoamento da água pelo furo.

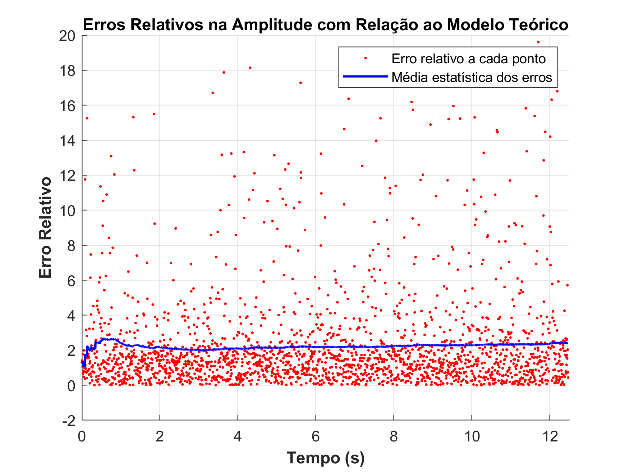


Figura 5. Erros relativos da amplitude da onda sonora em função do tempo, com o comportamento da média dos erros relativos representado pela curva azul.

Como medida de precisão do experimento em relação aos resultados teóricos, foram calculados os erros relativos ponto a ponto (em valor absoluto). Assim, a Figura 5 ilustra tais resultados, após aplicar o tratamento de Hampel [2], com o objetivo de retirar ospontos *outliers* estatisticamente para se ganhar clareza na análise dos desvios. Ainda, a Figura 5 demonstra a média dos erros relativos anteriores para se ter uma noção da variância dos dados.

A média para os erros relativos foi um valor de , ou seja, mais que o dobro do desvio em relação ao resultado esperado. Isso pode ser explicado, em maior parte, pelo fato de que o microfone utilizado captou ruídos externos enquanto o modelo teórico considerou apenas a onda estacionária formada.

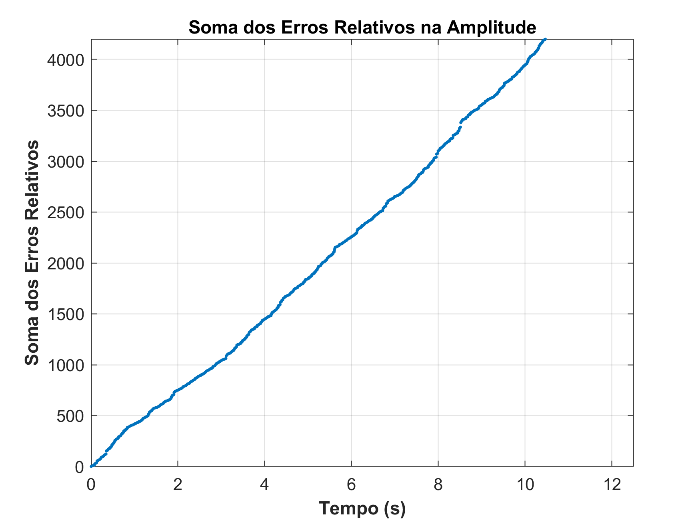


Figura 6. Soma de erros relativos ao longo do tempo.

O crescimento do erro relativo pode ser visto, através da Figura 6, como sendo uniforme, dado que a curva resultante da soma desses erros com o tempo é uma reta. Isso ajuda a comprovar o fato de que as imprecisões causadas na captação do som ocorreram devido a um ruído de fundo constante.

1. **Conclusão**

Do experimento realizado, foi possível, embora toda simplicidade em sua metodologia, conseguiu obter resultados próximos da teoria de ondas sonoras e ondas estacionárias, quando se observa a sobreposição das curvas experimentais (cor laranja) dos gráficos das Figuras 2 e 3. O resultado experimental, entretanto, apresentou-se com erro relativo ao teórico de 222,17%, cujo o comportamento ao longo do tempo pôde ser observado satisfatoriamente na Figura 5. Em suma, o método adotado não foi tão preciso devido a erros principais, tais como de paralaxe e ruídos, porém apresentou resultados visuais satisfatórios.

1. **Referências**

[1] CRAWFORD, F.S. Waves : Berkeley Physics Course. 1. Ed. Berkeley, California : McGRAW - Hill, Junho, 1968.

[2] www.mathworks.com/help/signal/ref/hampel.html. Acesso em 17/05/2018.

[3] PIERCE, A.D. and BEYER, R.T. Acoustics: An Introduction to its Physical Principles and Applications. The Journal of the Acoustical Society of America 87:4 (1990).

**Anexo A: Códigos Utilizados**

**A.1 Código Utilizado pelo Arduino para Emissão de uma Determinada Frequência pelo *Buzzer*:**

void setup() {

  pinMode(2, OUTPUT);

}

void loop() {

  tone(2, 1000);

}

**A.2 Código MATLAB que Tratou os Dados Experimentais:**

**A.2.1 grafOndasTubo.m**

%% parametros iniciais

f = 1000;

omega = 2\*pi\*f;

g = 9.81;

lambda = 340/f;

%% criacao da curva teorica 1s

t = 0:0.01:1;

y = cos(0.09\*f\*t + 0.09\*f\*t.^2).\*cos(0.09\*f\*t.^2);

dados = [t', y'];

save('dadosTeoricos\_1s.txt', 'dados', '-ascii');

%% criacao da curva teorica 12.5s

t = 0:0.01:12.5;

y = cos(0.09\*f\*t + 0.09\*f\*t.^2).\*cos(0.09\*f\*t.^2);

dados = [t', y'];

save('dadosTeoricos\_12.5s.txt', 'dados', '-ascii');

%% dados para calculo do erro

t = linspace(0, 12.4691, 2149);

y = cos(0.09\*f\*t + 0.09\*f\*t.^2).\*cos(0.09\*f\*t.^2);

dados = [t', y'];

save('dadosTeoricos\_erro.txt', 'dados', '-ascii');

%% grafico da curva teórica

figure(2)

plot(t,y)

**A.2.2 tratarDados.m**

tic;

A = load('sample-data.txt');

%% inicio do tratamento dos datos

% cada secao divide a quantidade de dados por 2

% isso eh feito para facilitar a vizualizacao dos graficos

%%

j = 1;

for i = 1:length(A)

    if(mod(i, 2) == 1)

        B(j, :) = A(i, :);

        j = j+1;

    end

end

%%

k = 1;

for i = 1:length(B)

    if(mod(i, 2) == 1)

        C(k, :) = B(i, :);

        k = k+1;

    end

end

%%

p = 1;

for i = 1:length(C)

    if(mod(i, 2) == 1)

        D(p, :) = C(i, :);

        p = p+1;

    end

end

%%

p = 1;

for i = 1:length(D)

    if(mod(i, 2) == 1)

        E(p, :) = D(i, :);

        p = p+1;

    end

end

%%

p = 1;

for i = 1:length(E)

    if(mod(i, 2) == 1)

        F(p, :) = E(i, :);

        p = p+1;

    end

end

%%

p = 1;

for i = 1:length(F)

    if(mod(i, 2) == 1)

        G(p, :) = F(i, :);

        p = p+1;

    end

end

%%

j = 1;

clear A;

for i = 1:length(F)

    if(mod(i, 2) == 1)

        A(j, :) = F(i, :);

        j = j+1;

    end

end

%%

k = 1;

clear B;

for i = 1:length(A)

    if(mod(i, 2) == 1)

        B(k, :) = A(i, :);

        k = k+1;

    end

end

%%

p = 1;

clear C;

for i = 1:length(B)

    if(mod(i, 2) == 1)

        C(p, :) = B(i, :);

        p = p+1;

    end

end

%%

p = 1;

clear D;

for i = 1:length(C)

    if(mod(i, 2) == 1)

        D(p, :) = C(i, :);

        p = p+1;

    end

end

%% imprime o tempo gasto, por curiosidade

t = toc;

sprintf('tempo gasto = %.4fs', t)

%% criacao dos graficos

% para 1s:

teoria\_1s = load('dadosTeoricos\_1s.txt');

figure(1)

plot(teoria\_1s(:, 1), teoria\_1s(:, 2), 'linewidth', 1.3);

hold on; grid on;

plot(C(1:174, 1), C(1:174, 2), 'linewidth', 1.3);

title('Comportamento das Curvas do Experimento até 1s');

xlabel('Tempo (s)', 'FontWeight', 'bold');

ylabel('Amplitude', 'FontWeight', 'bold');

axis([0, 1.01, -1, 1.01]);

legend('Curva teórica', 'Curva experimental');

hold off;

print -dpng -r300 images\curvaExp\_1s.png

% para 12.5s:

teoria\_12s = load('dadosTeoricos\_12.5s.txt');

figure(2)

plot(teoria\_12s(:, 1), teoria\_12s(:, 2));

hold on; grid on;

plot(C(:, 1), C(:, 2));

title('Comportamento das Curvas do Experimento Completo');

xlabel('Tempo (s)', 'FontWeight', 'bold');

ylabel('Amplitude', 'FontWeight', 'bold');

axis([0, 12.5, -1, 1.01]);

legend('Curva teórica', 'Curva experimental');

hold off;

print -dpng -r300 images\curvaExp\_12.5s.png

%%

% erros relativos

teoria\_erro = load('dadosTeoricos\_erro.txt');

errel(:) = abs(( teoria\_erro(:, 2) - C(:, 2) )./teoria\_erro(:, 2));

% tratamento de hampel para remover outliers

% (usou-se os 10 pontos em cada lado do ponto em questao)

% o ponto que desvia em mais de 15 unidades da media

hampelErrel = hampel(errel, 10, 15);

sumErrel = zeros(length(errel), 1);

sumErrel(1) = hampelErrel(1);

errel(1) = 0;

for i = 2:length(hampelErrel)

    sumErrel(i) = sumErrel(i-1) + hampelErrel(i);

end

mediaErros = zeros(length(sumErrel), 1);

for i = 1:length(sumErrel)

    mediaErros(i) = sumErrel(i)/i;

end

figure(3)

plot(C(:, 1), sumErrel, '.', 'linewidth', 1.3)

grid on;

title('Soma dos Erros Relativos na Amplitude');

xlabel('Tempo (s)', 'FontWeight', 'bold');

ylabel('Soma dos Erros Relativos', 'FontWeight', 'bold');

axis([0, 12.5, 0, 4200]);

print -dpng -r300 images\sumErrosRelativos.png

figure(4)

hold on; grid on;

plot(C(:, 1), hampelErrel, 'r.', 'linewidth', 1.3)

plot(C(:, 1), mediaErros, 'b', 'linewidth', 1.5)

title('Erros Relativos na Amplitude com Relação ao Modelo Teórico');

xlabel('Tempo (s)', 'FontWeight', 'bold');

ylabel('Erro Relativo', 'FontWeight', 'bold');

axis([0, 12.5, -2, 20]);

legend('Erro relativo a cada ponto', 'Média estatística dos erros');

hold off;

print -dpng -r300 images\errosRelativos.png

figure(5)

plot(A(:, 1), A(:, 2))

grid on;

title('Curva Experimental com Alta Densidade de Pontos');

xlabel('Tempo (s)', 'FontWeight', 'bold');

ylabel('Amplitude', 'FontWeight', 'bold');

axis([0, 12.5, -1, 1.01]);

%print -dpng -r300 images\curvaExp\_muitosDados\_12.5s.png

**A.3 Código no Wolfram Mathematica da Simulação do Modelo Teórico:**

(\*Gráfico do experimento\*)

f=1000; (\*A fonte sonora será de 400 Hz\*)

g=9.81; (\*Aceleração da gravidade em m/s^2\*)

L=0.5;(\*Altura inicial da coluna de água (m)\*)

t0=0; (\*Tempo inicial\*)

tfinal= Sqrt[2\*L/g]; (\*Tempo total de simulação\*)

y=Cos[90\*t+90\*t^2]\*Cos[90\*t^2];

Plot[y,{t,t0,tfinal}]

(\*Gráfico Interativo\*)

tfim=Sqrt[2\*L/g];

(\*tfim=0.32s utilizando L (comprimento inicial da coluna de água)=0.5 m\*)

Manipulate[Plot[Cos[2\*3.14\*f\*t+(3.14/2)\*(2\*g\*f\*(t^2)/340+1)]\*Cos[(3.14/2)\*(2\*g\*f\*(t^2)/340+1)],{t,0,tfim}],{f,200,2000}]