



UNICAMP

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Semicondutores, Instrumentação e Fotônica

Sistema Ultra-sônico para Medida Volumétrica

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por Isaiás Ferreira da Silva e aprovada pela Comissão Julgadora em 30 / 07 / 1999.

Orientador

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Autor : Isaiás Ferreira da Silva

Área de concentração : Eletrônica e Comunicações

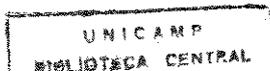
Orientador : Dr. Carlos Alberto dos Reis Filho

Comissão Julgadora : Dr. Sérgio Santos Mühlen – FEEC/UNICAMP

Dr. Antônio Fernando Penna – IFGW/UNICAMP

Campinas

Julho de 1999



UNIDADE	BC		
N.º CHAMADA:	T/UNICAMP		
	38s		
V.	Ex		
TOMBO BC/	40351		
PROC.	278/2000		
C	<input type="checkbox"/>	D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00		
DATA	12/02/2000		
N.º CPD			

CM-00138051-4

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si38s Silva, Isaías Ferreira da
 Sistema ultra-sônico para medida volumétrica. /
 Isaías Ferreira da Silva.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

 Orientador: Carlos Alberto dos Reis Filho
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

 1. Ultra-som. 2. Indicadores de nível líquido. 3.
Acústica arquitetônica. 4. Som – Medição. I. Reis
Filho, Carlos Alberto dos . II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação. III. Título.

"Pra mim basta o mistério da eternidade da vida e o esboço da maravilhosa estrutura da realidade. Basta o esforço sincero para tentar compreender, humildemente, uma porção, por minúscula que seja, da inteligência manifestada na natureza."

Einstein

À Raquel Gadiolli

Apresentação e agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido nas dependências do Departamento de Semicondutores Instrumentação e Fotônica - DSIF/FEEC/UNICAMP da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas, no período de agosto de 1997 a novembro de 1998 com o apoio do convênio celebrado entre a faculdade e a Magneti Marelli do Brasil – Divisão Eletrônica.

A todos aqueles que contribuíram com minha formação científica :

MsC. Vera Lúcia de Oliveira - CTC/Unicamp

MsC. João Batista de Melo Ayres Neto - Fundação CPqD

Dr. Mauro Monteiro Garcia de Carvalho - IFGW/Unicamp

MsC. Maria Beny Zakia Morossini - IFGW/Unicamp

Dr. Aruy Marotta - IFGW/Unicamp

MsC. Marilda Rovai Slonka - Fundação CTI

MsC. Sebastião Eleutério Filho - Fundação CTI

Dr. Carlos Alberto dos Reis Filho - FEEC/Unicamp

Orientadores de pesquisa ao longo dos anos de estudo, e a todos aqueles que de alguma forma contribuíram e ansiaram pelo bem deste trabalho e de minha formação acadêmica, meus agradecimentos.

Meu muito obrigado à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e à Magneti Marelli do Brasil por proporcionarem as condições necessárias ao desenvolvimento deste projeto.

Resumo

Um método inovador para a medida do volume de um líquido dentro de um recipiente fechado é proposto. A motivação deste trabalho é a aplicação do método para a medida do volume de combustível dentro de um tanque de automóvel.

Este método se baseia no fenômeno de reverberação sonora que relaciona o tempo de decaimento da intensidade do som dentro de um ambiente com o seu volume. Este tempo, conhecido como tempo de reverberação, está associado ao volume vazio dentro do recipiente, ao material com o qual é feito e ao tipo de líquido que este recipiente contém. Sendo conhecido o volume total do recipiente, determina-se o volume de líquido presente.

Para determinar a relação existente entre o tempo de reverberação e o volume de líquido é necessário conhecer as características acústicas do sistema; para isto foram realizados experimentos em um recipiente metálico de dimensões semelhantes as de um tanque automotivo, utilizando-se água como líquido cujo volume deve ser medido. Como fonte sonora utiliza-se um transdutor de ultra-som ao qual se aplicam pulsos de excitação periódica. O resultado destes experimentos têm confirmado a validade do método proposto.

Abstract

An innovative method to measure the liquid volume inside an enclosure container is proposed. The motivation for this research work has been the development of a system to measure the fuel volume in an automotive fuel tank.

This method is based on the reverberation phenomenon, which relates the sound power time decay in a vessel with its volume. By measuring this time, which is known as reverberation time, the empty volume inside the enclosure can be determined. Once the total volume is known the liquid volume is found. The reverberation time is dependent on the empty volume inside the enclosure, the material properties of the vessel and the liquid inside the enclosure.

The acoustical characteristics of the system are determined by several experiments with a metallic enclosure, whose dimensions are approximately the same as those an automotive fuel tank. The sound source is an ultrasonic transducer excited by periodic bursts. Experimental results have confirmed the validity of the proposed method.

Sumário

Apresentação e agradecimentos	iii
Resumo.....	iv
Abstract	iv
Índice das figuras	vii
Índice das tabelas	ix
1. Introdução.....	01
<i>Sistema em uso</i>	01
<i>Sistemas alternativos de medida de nível</i>	02
<i>Sistemas de medida volumétrica</i>	03
<i>Sistema proposto</i>	04
2. Fundamentos Teóricos.....	05
<i>O fenômeno da reverberação</i>	05
<i>Tempo de reverberação</i>	05
<i>Dedução teórica do tempo de reverberação</i>	06
<i>Limitações de aplicabilidade</i>	11
3. Descrição do sistema	12
<i>Introdução</i>	12
<i>Implementação</i>	12
<i>Funcionamento</i>	13
<i>Metodologia de cálculo</i>	14
4. Circuito de aquisição	18
<i>Filtro passa altas</i>	19
<i>Amplificador de instrumentação</i>	19
<i>Filtro passa faixa de 40 kHz</i>	19
<i>Retificadores, inversor e somador</i>	19
<i>Detetor de envoltória</i>	20

5. Procedimento experimental	22
<i>Objetivos</i>	22
<i>Descrição dos experimentos</i>	22
<i>Metodologia de análise</i>	23
6. Apresentação dos resultados.....	26
<i>Medidas estáticas e medidas dinâmicas</i>	26
<i>Tipos de transdutores</i>	28
<i>Posicionamento dos sensores</i>	34
<i>Difusor interno</i>	36
<i>Alterações de frequência</i>	37
<i>Menor variação de volume</i>	41
<i>Medições diversas</i>	43
<i>Reprodutibilidade</i>	46
<i>Variabilidade</i>	51
7. Análise dos dados	54
8. Outros fatores de influência	59
<i>Ondas estacionárias</i>	59
<i>Coefficiente de absorção</i>	60
<i>Coefficiente de atenuação do ar</i>	60
9. Conclusões.....	61
10. Referências bibliográficas	62
Anexo I.....	65
Anexo II	67

Índice das Figuras

<i>Figura</i>	<i>Página</i>
1. Sistema de medição de combustível.....	01
2. Caminhos das ondas sonoras da fonte até o receptor.....	05
3. Sistema experimental de medição	13
4. Forma de onda entregue ao transmissor	14
5. Forma de onda do decaimento.....	15
6. Decaimento em RMS.....	16
7. Apresentação dos valores em dB.....	16
8. Metodologia de cálculo	17
9. Diagrama em blocos do circuito de condicionamento.....	18
10. Sinal na saída do filtro passa faixa	20
11. Sinal na saída do detetor de envoltória	21
12. Decaimento da amplitude sem agitação	27
13. Decaimento da amplitude com agitação	28
14. Transmissor : <i>buzzer</i> - Receptor: RT40.....	30
15. Transmissor : TR89 - Receptor: RT40	30
16. Transmissor : <i>buzzer</i> - Receptor: RT40 sem cobertura.....	31
17. Transmissor : ST40 sem cobertura - Receptor: RT40 sem cobertura.....	31
18. Transmissor : <i>buzzer</i> - Receptor: microfone eletreto.....	32
19. Transmissor : ST40 sem cobertura - Receptor: microfone eletreto	32
20. Transmissor : <i>buzzer</i> - Receptor: <i>buzzer</i>	33
21. Transmissor : ST40 com tubo frontal - Receptor: RT40 com tubo frontal	33
22. Medições em diversas posições.....	35
23. Medições em diversas posições – <i>buzzer</i> :	35
24. Frequência de 6 kHz.....	38
25. Frequência de 8 kHz.....	38
26. Frequência de 10 kHz.....	39
27. Frequência de 5 kHz - <i>buzzer</i>	39
28. Frequência de 10 kHz – <i>buzzer</i> :	40
29. Frequência de 20 kHz – <i>buzzer</i> :	40
30. Variação de 0,5 l – sem tela difusora.....	41
31. Variação de 0,5 l – com tela difusora	42

32. Tempo de reverberação - Variação de 0,5 l – sem tela.....	42
33. Seqüência com o cálculo RMS	44
34. Seqüência sem o cálculo RMS	44
35. Seqüência com o cálculo RMS	45
36. Seqüência sem o cálculo RMS	45
37. Variação do tempo de reverberação – valores médios	49
38. Desvio médio em cada nível.....	49
39. Variação volumétrica medida – valores médios	50
40. Desvios em cada medida – valores médios	50
41. Dispersão dos valores de volume em cada nível	53

Índice das Tabelas

	<i>Página</i>
Tabela 1 : Medidas com e sem agitação.....	26
1a – Medidas em repouso.....	26
1b – Medidas com agitação	26
Tabela 2 : Valores obtidos com diversos transdutores.....	29
Tabela 3 : Uso do difusor interno.....	36
3a – Valores com tela	36
3b – Valores sem tela.....	37
Tabela 4 : Valores obtidos com várias frequências.....	37
Tabela 5 : Valores para uma variação de 0,5 litro.....	41
Tabela 6 : Cálculos efetuados com e sem o valor RMS.....	43
Tabela 7 : Conjunto de medições para vários níveis.....	47
7a – 1 a 10 litros.....	47
7b – 11 a 20 litros.....	48
Tabela 8 : Variabilidade das medidas	51
Tabela 9 : Valores de volume.....	52

I-Introdução

Sistema em uso

Na atualidade, a medida da quantidade de combustível presente em um tanque de automóvel é feita através da medição da altura do nível de líquido. O sistema consiste no uso de uma bóia cujo eixo é ligado a uma resistência de forma que uma variação no nível de combustível se traduz numa variação da resistência elétrica (figura 1). Um circuito elétrico transforma esta variação de resistência em uma indicação do nível de combustível no painel do veículo. Este sistema não é preciso e normalmente apresenta uma indicação dada em frações da capacidade total do tanque, mostrando assim apenas uma estimativa grosseira da quantidade de combustível presente.

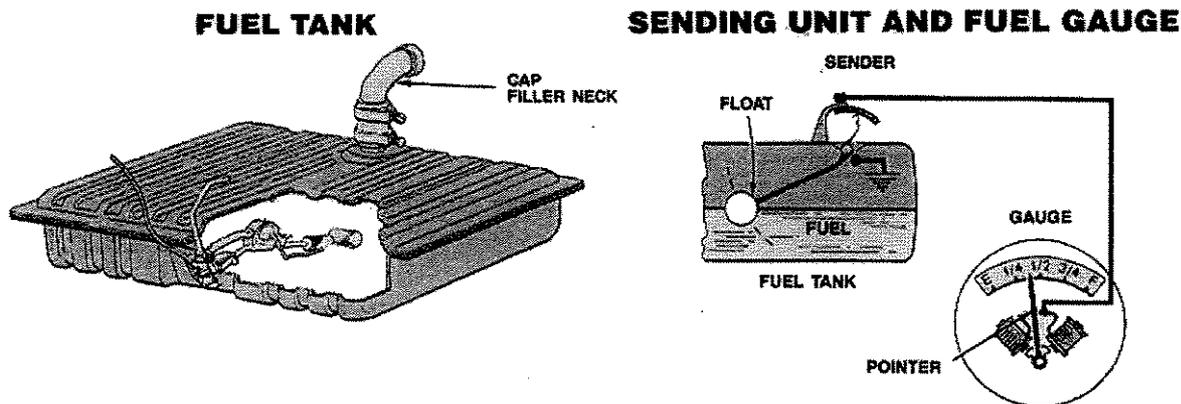


Figura 1 : Sistema de medição de combustível ¹

Não obstante o largo emprego que este sistema tem nos automóveis atuais, existem diversos problemas associados ao seu uso que só podem ser completamente resolvidos com uma mudança radical no método de medição. O valor apresentado demonstra imprecisões decorrentes do fato da medida de volume ser inferida a partir de uma medida de altura tomada em um único ponto de toda a extensão do tanque. Isto faz com que o sistema fique sujeito à atuação das forças dinâmicas que agem sobre o veículo, como trepidação, aceleração, etc., além, é claro, de sofrer desvios dependendo das inclinações da estrada por onde circula o automóvel. Afim de eliminar parcialmente estes problemas os automóveis mais modernos dispõem de um sistema digital de tratamento de sinais, no qual se faz uso de um microcontrolador para eliminar as ondulações e apresentar uma medida mais estável.

Estes sistemas, porém, encarecem o produto final e ainda fazem com que o tempo de resposta do medidor seja bastante demorado em virtude de simularem um filtro de constante de tempo elevada. Nos automóveis antigos o efeito de filtro era conseguido usando-se um indicador do tipo térmico no painel.

Outro ponto crítico neste sistema mecânico é o resistor associado à bóia, que deve ser desenhado de maneira a acompanhar a forma do tanque afim de dar uma indicação aproximadamente linear de acordo com o nível de combustível. A fabricação deste resistor, feito normalmente de filme espesso sobre cerâmica, exige o uso de equipamentos sofisticados e caros, tarefa que fica cada vez mais custosa em consequência da tendência à redução do volume dos carros exigindo tanques de combustível de formas cada vez mais irregulares.

Como este sistema também apresenta partes mecânicas móveis existe um desgaste natural e uma consequente redução da confiabilidade. De fato, o sistema indicador de nível de combustível é responsável por um grande número de reclamações às montadoras e a uma constante manutenção que nem sempre é bem sucedida, exigindo em alguns veículos a troca de todo o tanque juntamente com a bóia, uma vez que para alguns modelos a simples substituição da bóia é proibitiva.

Sistemas alternativos de medida de nível

Extensas pesquisas têm sido feitas com o objetivo de se encontrar uma solução economicamente viável para a substituição do sistema de bóia. Muitas destas inovações têm sido aplicadas com sucesso no ramo industrial para a medida do nível de sólidos e líquidos em um recipiente². Estes sistemas são na sua grande maioria de três tipos : capacitivos, de pressão e ultrassônicos. Existem diversas configurações e metodologias de medida para estes sistemas e um número considerável de patentes envolvendo os mesmos.

No sistema capacitivo duas placas condutoras são colocadas dentro do tanque, formando um capacitor parcialmente submerso no líquido, de forma que com a variação do nível de fluido varie também a porção das placas que fica submersa. Como a constante dielétrica do líquido é diferente da do ar (ou vapores) a capacitância varia conforme o nível varia. Este é o sistema mais usado em aeronaves, uma vez que possibilita uma medida bem mais precisa do que o sistema de bóia e é mais compacto. No entanto, a principal deficiência deste sistema é a dependência com a temperatura e com as características químicas do líquido, uma vez que estes parâmetros alteram a constante dielétrica. Isto também faz com que a medida seja afetada pela corrosão e pelo crescimento de depósitos microbianos nas superfícies do tanque.

Como o capacitor está localizado em um único ponto do tanque, normalmente é necessário o uso de vários capacitores e um sistema computacional para compensar as inclinações do tanque.

Isto encarece muito o sistema, restringindo seu uso para fins aeronáuticos, onde o custo não é o fator mais importante. Já no campo automotivo os sistemas propostos são geralmente bem mais caros que os sistemas de bóia, dificultando sua implementação em larga escala nos carros populares. A patentes de Barkhoudarian Sarkis³ e também de Hiroshi Kobayashi⁴ são dois tipos de sistemas de medida de combustível para veículos baseados no uso de capacitores.

Na medida do nível de combustível através da pressão, é colocado um sensor de pressão, normalmente no fundo do recipiente, e mede-se a pressão exercida pela coluna de líquido. Desta maneira podem ser utilizados diversos tipos de sensores como os piezolétricos e os de vibração. Há, porém, uma forte dependência com a inclinação de tal modo que para aumentar a precisão da medida, é necessário o uso de diversos sensores. A patente de Glenn Stevens e Roger Kennedy⁵ é um exemplo deste tipo de implementação.

Os métodos já propostos e que fazem uso do ultra-som se baseiam na medida do tempo de propagação da onda sonora entre a superfície do líquido e o topo (ou fundo) do tanque. Funcionam, portanto, da mesma maneira que o sonar medindo a distância entre dois pontos. Da mesma forma que os sistemas anteriormente citados, a medida é feita localmente e está sujeita às inclinações e oscilações da superfície. Para maior exatidão, diversos sensores devem ser distribuídos ao longo do tanque afim de minimizar estes defeitos, resultando num conseqüente aumento de custos.

Outro ponto negativo deste método é que a velocidade do som no ar depende da temperatura e também da densidade do meio. Isto gera imprecisões na medida e alguns sistemas utilizam alvos fixos de modo que a velocidade do som possa primeiramente ser determinada e o tempo possa ser medido com maior precisão. Um exemplo de sistema de medida ultra-sônico é encontrado na patente de Ellinger e Jones⁶ e também na de Gazis, Kane e Gutfeld⁷ onde métodos computacionais são utilizados para se minimizar o efeito das vibrações.

Sistemas de medida volumétrica

A medida volumétrica de combustível traz uma vantagem intrínseca quando comparada aos métodos tradicionais de medida de nível, que é a de ser virtualmente insensível à balanços uma vez que o volume não se altera com as ondulações e inclinações da superfície do combustível durante o funcionamento normal do veículo.

As técnicas capazes de fazer a medida de volume são mais complexas e sofisticadas que as de medidas de nível e na sua maioria encontram-se em estágio de desenvolvimento. Normalmente o que se mede é o volume de ar ou vapor, no caso do líquido dentro do tanque ser volátil como é o caso dos combustíveis, e então o volume de líquido é deduzido do volume total do tanque.

No método apresentado na patente de Jean-Louis Prost e Daniel Gross⁸ é colocada uma membrana em uma das paredes do tanque e mede-se o tempo que a membrana leva para retornar até a sua posição original depois de sofrer uma distensão. Este tempo tem uma relação direta com o volume de ar no tanque. Neste método a medida não sofre influência da inclinação ou vibrações, no entanto é sensível à variação da pressão de vapor dentro do tanque, necessitando também de um sensor de temperatura e de um microprocessador para efetuar os cálculos.

Um outra forma para medida do volume é apresentada por Kenn Bates e David Chang⁹, onde o volume de ar é determinado por métodos acústicos medindo-se a frequência de ressonância da massa de ar. Este método é capaz de medir sólidos, líquidos ou pó, mas tem como característica desfavorável uma implementação bastante complexa. Além disso, opera numa frequência muito baixa, que é característica da massa de ar, podendo apresentar problemas de compatibilidade em ambientes ruidosos como o de um automóvel.

Sistema proposto

Neste trabalho desenvolvemos um sistema alternativo para a medida volumétrica da quantidade de líquido em um recipiente fechado como o tanque de combustível em um automóvel. O volume de ar existente entre a superfície do líquido e o resto do recipiente é determinado a partir de uma medida do tempo de reverberação. Esta medida é feita em uma frequência compatível com as dimensões do recipiente em uso.

Este método também apresenta imunidade às inclinações do tanque e às ondulações da superfície, impondo-se como uma alternativa promissora em relação aos demais métodos de medida volumétrica devido à sua simplicidade de implementação física e eletrônica.

II – Fundamentos Teóricos

O fenômeno da Reverberação

Um som ao ser emitido em um ambiente fechado permanece audível ainda por um dado período de tempo mesmo depois de cessado o estímulo da fonte sonora. Isto acontece porque as ondas sonoras sofrem múltiplas reflexões nas paredes que compõem os contornos do ambiente e continuam sendo refletidas até que atinjam o receptor (figura 2). A este fenômeno dá-se o nome de reverberação sonora^{10,11}.

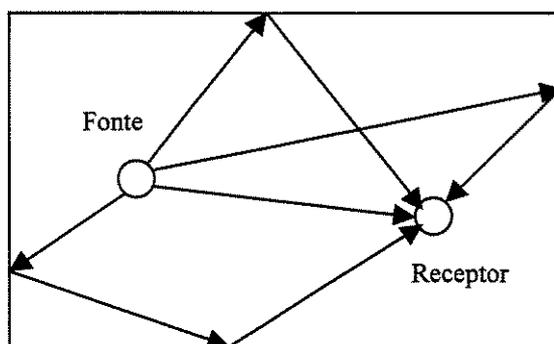


Figura 2 : Caminhos das ondas sonoras da fonte até o receptor

Em cada reflexão, parte da energia sonora é absorvida pelo material do qual se constituem as paredes. Isto faz com que a intensidade sonora decaia de forma exponencial à medida que vai sofrendo as reflexões.

O tempo em que o som permanece audível depende do volume do ambiente e da quantidade de energia absorvida. Assim, se a absorção total das paredes for conhecida o volume pode ser determinado a partir de uma medida deste tempo. Na prática, o que se mede é o tempo que a intensidade sonora leva para decair até um milésimo do seu valor inicial (-60 dB) e que é conhecido como tempo de reverberação.

Tempo de reverberação

A medida do tempo de reverberação tem sido o principal parâmetro para a qualificação da acústica de um ambiente. Foi o físico Wallace Clement Sabine quem primeiro estabeleceu uma relação entre o tempo de reverberação e o volume do ambiente que ficou conhecida como equação de Sabine¹² :

$$T = \frac{0,16V}{\sum \alpha_i S_i}$$

Onde :

V = volume

α_i = coeficiente de absorção (representa a proporção de energia absorvida em cada incidência sonora)

S_i = área da superfície considerada

0,16 = constante de proporcionalidade para as unidades do sistema métrico decimal

Esta equação foi desenvolvida por Sabine em 1895 de forma empírica a partir de observações do tempo de decaimento da intensidade sonora em uma sala de concertos. Logo, para que a aplicação desta mesma equação possa ter validade em um ambiente de características físicas diferentes, uma visão criteriosa do fenômeno e uma dedução teórica válida para qualquer ambiente precisa ser desenvolvida.

Dedução teórica do tempo de reverberação

Seguindo o desenvolvimento apresentado por Kuttruff¹³ em seu livro *Room Acoustics*, e assumindo que a frequência do som é suficientemente elevada para que os efeitos ondulatórios possam ser desconsiderados, podemos proceder a uma dedução teórica bastante precisa do tempo de reverberação. Primeiramente, vamos considerar uma partícula sonora com velocidade c observada durante um espaço de tempo t no interior de um ambiente de forma genérica. Neste intervalo de tempo ela percorre a distância $c.t$. Sendo N o número de reflexões sofridas pela partícula no decorrer do período t , podemos encontrar o caminho médio \bar{l} percorrido por esta partícula :

$$\bar{l} = \frac{c.t}{N} \quad [\text{II.1}]$$

O número de reflexões por unidade de tempo \bar{n} ou seja a frequência média de reflexões é dado por :

$$\bar{n} = \frac{N}{t} \quad \text{logo} \quad \bar{l} = \frac{c}{\bar{n}} \quad [\text{II.2}]$$

As equações II.1 e II.2 definem os valores de \bar{l} e \bar{n} para uma única partícula sonora. Para que estes valores expressem os valores médios válidos para todo o campo sonoro, deveriam ser efetuados diversos cálculos em vários momentos ou o cálculo para um grande número de partículas em um único instante, todavia se considerarmos um campo sonoro difuso, onde todas as partículas sonoras apresentam valores médios iguais, estas expressões permanecem válidas para descrever o comportamento de todo o sistema.

A probabilidade (P) de uma partícula sonora ser refletida por uma superfície num ângulo sólido $d\Omega$, formando um ângulo ϑ com a normal do elemento de superfície em questão é dada a partir da aplicação da lei dos cossenos de Lambert¹⁴:

$$P(\vartheta)d\Omega = \frac{1}{\pi} \cos \vartheta . d\Omega \quad \text{[II.3]}$$

Como a lei de Lambert é deduzida para um campo sonoro considerado difuso em toda a sua extensão, esta probabilidade não depende da história anterior da partícula; ou seja, qual o seu ângulo de incidência ou qual a sua energia antes de colidir com o elemento de superfície.

Se considerarmos todos os caminhos possíveis (R_{DS}) para as partículas sonoras, e obtivermos uma média destes caminhos sobre todos os elementos de área ds e sobre todas as direções (ϑ), então podemos escrever:

$$\bar{l} = \frac{1}{S} \iint_S R_{DS}(\vartheta) d\vartheta ds \quad \text{[II.4]}$$

Onde S é a superfície interna do ambiente considerado. No entanto os caminhos R_{DS} não têm a mesma probabilidade de ocorrer, variando de acordo com o ângulo ϑ da forma descrita pela equação II.3, então combinando as equações II.3 e II.4 temos:

$$\bar{l} = \frac{1}{S} \iint_S R_{DS}(\vartheta) dS \frac{1}{\pi} \iint_{2\pi} \cos \vartheta d\Omega \quad \text{[II.5]}$$

Como só é considerada a superfície interna do ambiente, o ângulo sólido $d\Omega$ apenas é integrado sobre a semi esfera interna de valor total 2π .

Que podemos rescrever como :

$$\bar{l} = \frac{1}{\pi S} \iint_S R_{DS}(\vartheta) \cos \vartheta ds \int_{2\pi} d\Omega \quad [\text{II.6}]$$

A primeira integral expressa o volume de um cilindro infinitesimal de altura R_{DS} e base ds que integrado sobre toda a superfície resulta no dobro do volume do ambiente - $2V$, onde V é o volume total do ambiente. A segunda integral apresenta o valor 2π . Deste modo, temos que:

$$\bar{l} = \frac{1}{\pi S} 2V 2\pi \Rightarrow \bar{l} = \frac{4V}{S} \quad [\text{II.7}]$$

Comparando-se II.7 com a expressão II.2 podemos escrever uma nova equação para a frequência das reflexões \bar{n} :

$$\boxed{\bar{n} = \frac{cS}{4V}} \quad [\text{II.8}]$$

A equação II.8 que representa o número de reflexões por unidade de tempo foi deduzida admitindo-se a presença de um campo sonoro totalmente difuso. Com esta equação e com uma expressão adequada para a energia sonora que deduziremos a seguir, demonstraremos a expressão do tempo de reverberação.

Para efetuar uma simplificação dos cálculos vamos considerar que existem apenas dois tipos de superfície que formam as paredes internas do ambiente. Os resultados, porém, permanecem válidos para o caso geral em que podem existir várias superfícies e vários coeficientes de absorção associados.

Sendo S_1 a superfície com coeficiente de absorção α_1 e S_2 a superfície com coeficiente de absorção α_2 e $S = S_1 + S_2$ a superfície total interna do ambiente, consideremos uma partícula sonora que sofre um número total de N reflexões. N_1 é o número de reflexões sofridas na superfície S_1 e $N_2 = N - N_1$ é o número de reflexões sofridas na superfície S_2 . A probabilidade de ocorrerem N_1 reflexões na superfície S_1 é independente do passado histórico da partícula, uma vez que o campo é difuso, e é dada por uma distribuição binomial¹⁵:

$$P_N(N_1) = \binom{N}{N_1} \left(\frac{S_1}{S}\right)^{N_1} \left(1 - \frac{S_1}{S}\right)^{N-N_1} = \binom{N}{N_1} \left(\frac{S_1}{S}\right)^{N_1} \left(\frac{S_2}{S}\right)^{N-N_1} \quad [\text{II.9}]$$

S_1/S é a probabilidade da partícula ser refletida pela superfície S_1

S_2/S é a probabilidade da partícula ser refletida pela superfície S_2

Se uma partícula sonora tem uma energia inicial E_0 , após sofrer N_1 reflexões com a superfície S_1 e $N_2 = N - N_1$ reflexões com a superfície S_2 a energia desta partícula passa a ser :

$$E_N(N_1) = E_0 (1 - \alpha_1)^{N_1} (1 - \alpha_2)^{N-N_1} \quad [\text{II.10}]$$

O valor esperado para esta energia após a partícula sofrer N reflexões é dado por:

$$\langle E_N \rangle = \sum_{N_1=0}^N E_N(N_1) P_N(N_1)$$

Substituindo as equações II.9 e II.10 e fazendo uso do teorema binominal¹⁴, a expressão para o valor esperado da energia pode ser escrita da seguinte forma :

$$\langle E_N \rangle = E_0 \left[\frac{S_1}{S} (1 - \alpha_1) + \frac{S_2}{S} (1 - \alpha_2) \right]^N \quad [\text{II.12}]$$

E como $S_1 + S_2 = S$

$$\langle E_N \rangle = E_0 (1 - \bar{\alpha})^N, \quad \bar{\alpha} = \frac{1}{S} (S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2)$$

Que pode ser colocada na forma exponencial :

$$\langle E_n \rangle = E_0 \exp[N \ln(1 - \bar{\alpha})] \quad [\text{II.13}]$$

A expressão II.13 mostra o valor esperado para a energia da partícula sonora após sofrer N reflexões e o termo $\bar{\alpha}$ nesta expressão denota o fato que os coeficientes de absorção contribuem como uma média aritmética onde o peso de cada coeficiente é ditado pela área da superfície a que este corresponde.

Para obtermos o valor da energia ao longo do tempo basta substituírmos o número total de reflexões no tempo t , que é N , pelo número de reflexões esperado ao longo deste tempo, que é $\bar{n} \cdot t$, onde \bar{n} é a frequência de reflexões por unidade de tempo que é dada pela equação II.8, logo :

$$E(t) = E_0 \exp\left[\frac{cS}{4V} t \ln(1 - \bar{\alpha})\right] \quad \text{[II.14]}$$

Assim temos a expressão para o decaimento da energia ao longo do tempo. Como o tempo de reverberação é o tempo necessário para que a intensidade sonora decaia a um milésimo (-60 dB) do seu valor inicial, a expressão para o tempo de reverberação pode ser deduzida a partir desta equação :

$$RT_{60} = -\frac{24V \ln 10}{cS \ln(1 - \bar{\alpha})} \Rightarrow -0.163 \frac{V}{S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad \text{[II.15]}$$

Em II.15 o valor da velocidade do som no ar (c) foi assumido como sendo de 339 m/s e $\bar{\alpha}$ pode ser generalizado para o caso em que temos mais de dois coeficientes de absorção :

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum S_i \alpha_i \quad \text{[II.16]}$$

O termo $\sum S_i \alpha_i$ representa a capacidade de absorção sonora de todo o ambiente, e é chamado de absorvidade total.

A equação de Sabine, apresentada anteriormente, é uma particularidade da equação II.15, no caso em que $\bar{\alpha}$ é pequeno quando comparado à unidade. Neste caso, $\ln(1 - \bar{\alpha})$ pode ser substituído por $-\bar{\alpha}$, primeiro termo da expansão em série de $\ln(1 - \bar{\alpha})$.

Se considerarmos a influência da atenuação sonora no ar a equação II.15 pode ser complementada, Neste caso, a equação II.14 é multiplicada pelo termo e^{-mct} , onde m é o coeficiente de atenuação, resultando num acréscimo do termo $-4mV$ ao denominador de II.15.

$$RT_{60} = -0.163 \frac{V}{S \ln(1 - \bar{\alpha}) - 4mV} \quad [\text{II.17}]$$

Limitações de aplicabilidade

O modelo apresentado anteriormente é válido nas situações em que o som pode ser descrito como um conjunto de feixes sonoros compostos de partículas capazes de serem refletidas nas superfícies internas do ambiente¹⁶. Este modelo, portanto trata a energia sonora como algo material, assim como em alguns casos a luz é tratada como matéria. Desta forma, é necessário que o comportamento ondulatório do som seja desprezado e, como mencionado, seja visto como feixes de partículas. Esta situação só é válida no caso de altas frequências¹⁷, alta o suficiente para que o seu comprimento de onda seja muito menor do que a menor dimensão presente no ambiente¹⁸. Se a frequência não for suficientemente alta ocorrerão manifestações do caráter ondulatório do som, como difração, e nestes casos a teoria da reverberação não será mais válida.

Um outro compromisso adotado na elaboração do modelo é a existência de um campo sonoro completamente difuso no interior do ambiente. Um campo difuso é aquele que apresenta em qualquer posição a incidência de ondas sonoras vindas de todas as direções com igual intensidade e com relações de fase randômicas entre elas¹⁹. Na prática, porém, um campo sonoro completamente difuso só pode ser conseguido em um ambiente de forma cúbica, com superfícies refletindo o som difusamente e com coeficientes de absorção uniformemente distribuídos¹³. Num ambiente onde não se verifiquem estas condições teremos um campo sonoro parcialmente difuso e portanto a teoria da reverberação, da forma como foi desenvolvida, não será mais perfeitamente aplicável.

III- Descrição do sistema

Introdução

A utilização da reverberação sonora na medição do volume de combustível se baseia na medida do tempo de reverberação do espaço formado pela parte não preenchida com líquido no recipiente. Para a medida do tempo de reverberação é produzido um pulso sonoro (*burst*) no interior do recipiente, que se encontra fechado, e é feita a medida da intensidade sonora nos instantes posteriores ao fim do *burst*. A partir da forma de onda que se obtém com o decaimento do sinal sonoro, calcula-se o tempo de reverberação e o volume é determinado por uma regressão geométrica simples, onde os parâmetros foram deduzidos experimentalmente com base nas fórmulas apresentadas anteriormente.

O volume real do combustível é obtido subtraindo-se o volume calculado (volume vazio) do volume total do recipiente. Este método possibilita que o volume de líquido seja medido com razoável precisão independentemente das ondulações na superfície do líquido, uma vez que o volume total não se altera com as ondulações.

Implementação

Um sistema experimental para a medida do tempo de reverberação sonora foi implementado, sendo composto basicamente de :

- recipiente fechado que funciona como tanque de combustível
- fonte sonora (transmissor)
- circuito de excitação para o transmissor (oscilador)
- circuito de *trigger* (*clock*)
- receptor
- circuito condicionador de sinal do receptor (filtros e casador de impedância)
- amplificador
- fonte de alimentação

Afim de possibilitar a medida do volume, foi utilizado um osciloscópio digital para capturar e armazenar a forma de onda do sinal e um microcomputador para efetuar os cálculos e apresentar os resultados.

O recipiente utilizado para a elaboração das experiências foi um tanque cilíndrico feito de alumínio de 18 cm de raio e 32 cm de altura, totalizando um volume de 32 litros.

Como fonte sonora utiliza-se um transdutor operando em uma frequência de 40 kHz. Nesta frequência as ondas sonoras apresentam um comprimento de onda (λ) de aproximadamente 8,5mm, sendo portanto de menor dimensão que as dimensões do recipiente utilizado como tanque.

Uma mostra simplificada do sistema construído é apresentada no diagrama em blocos da figura 3. Os transdutores utilizados como receptor e transmissor são do tipo piezoelétricos, como os utilizados em sistemas de alarme automotivo.

Transdutores utilizados:

transmissor : ST40-12K

receptor : RT40-12K

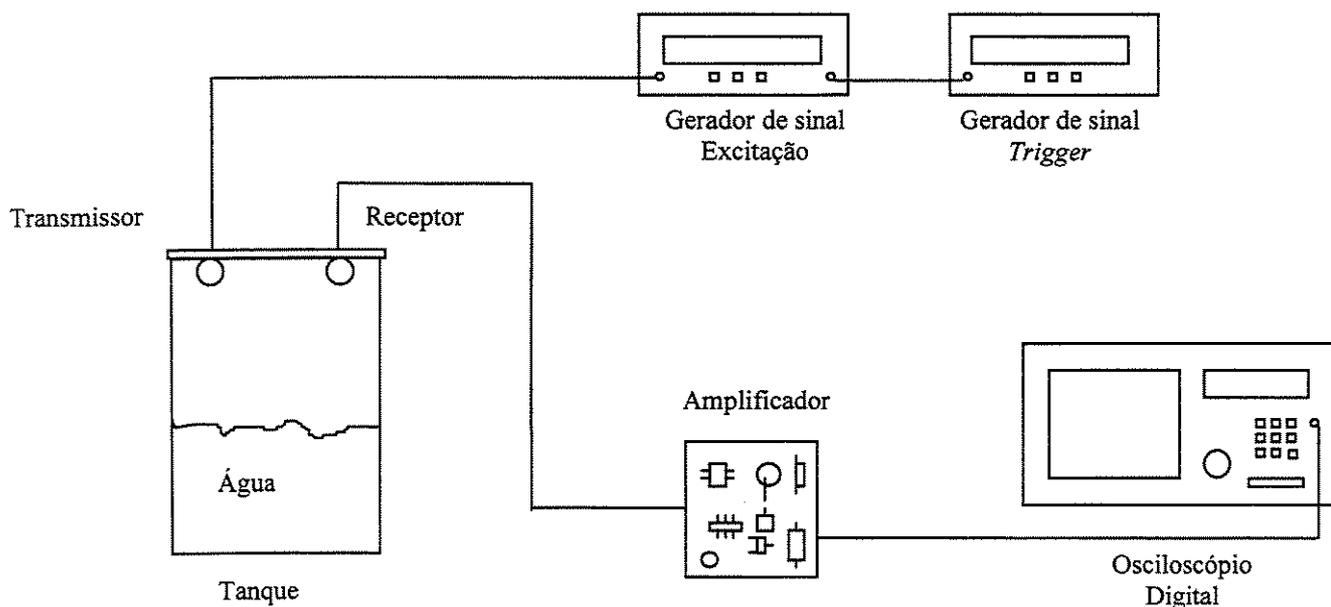


Figura 3 : Sistema experimental de medição

Funcionamento

O circuito de excitação (gerador de sinais) gera um conjunto de pulsos de onda quadrada em 40 kHz (*bursts*) com um certo número de ciclos (tipicamente cinco) cuja frequência de repetição é determinada pelo outro gerador de sinais que opera como *trigger* numa frequência típica de 10 Hz. Desta forma é entregue ao transdutor transmissor uma forma de onda como a da figura 4 (onde a frequência de repetição foi aumentada para permitir a observação de um conjunto de *bursts*). Tanto o número de ciclos como a amplitude do sinal entregue ao transmissor e também a frequência do sinal de *trigger* podem ser mudados através dos geradores de sinal. Na etapa de desenvolvimento, vários valores destes parâmetros foram experimentados afim de se fazer uma análise de suas influências sobre o sistema, buscando-se a melhor condição de operação.

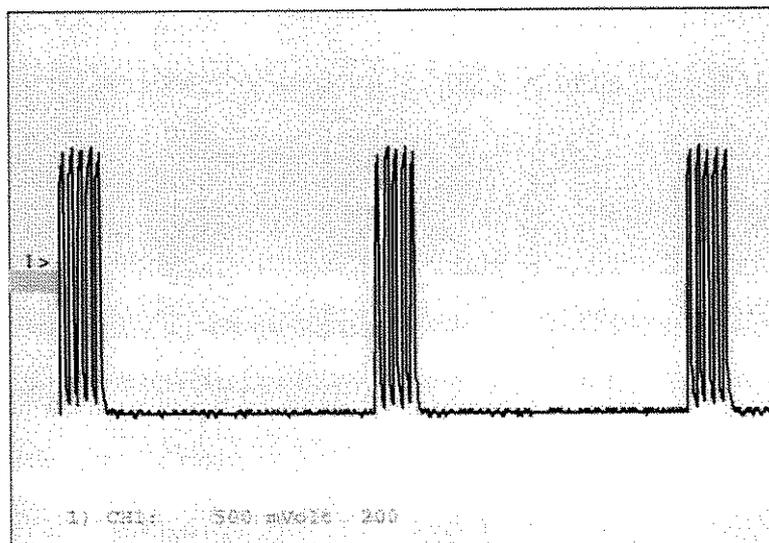


Figura 4 : Forma de onda entregue ao transmissor

O sinal captado no transdutor receptor passa por um conjunto de circuitos compostos de filtros e de um amplificador de alto ganho, antes de ser digitalizado no osciloscópio. A forma de onda do osciloscópio é armazenada em um disquete como um arquivo de tabela, representando a amplitude do sinal ao longo do tempo, este arquivo pode ter o formato CSV ou WFM. Uma vez no microcomputador o arquivo é transferido para o Microsoft® Excel onde os cálculos são efetuados. Se os dados estiverem no formato CSV eles são lidos diretamente, senão torna-se necessário que o arquivo seja aberto no programa WaveStar® da Tektronix e depois transferido para o Excel num formato compatível.

Metodologia de cálculo

A forma de onda do decaimento representada pelo arquivo .CSV ou .WFM tem o aspecto mostrado na figura 5, onde pode ser observado que a intensidade do sinal decai de forma aproximadamente exponencial como prevê a equação II.14. Na figura 5 também se vê que a forma de onda apresenta irregularidades, notadamente no início do decaimento. Para eliminar estas imperfeições e suavizar a forma de onda é feita uma integração deste sinal pelo cálculo do valor RMS (modificado) para cada um dos pontos amostrados²⁰. Após esta integração o sinal adquire o aspecto da figura 6, onde o decaimento exponencial já é perfeitamente notado.

Com base nestes valores de RMS é calculado o valor em dB para cada um dos pontos, tendo como referência o máximo valor de RMS encontrado na tabela. O cálculo em dB lineariza o decaimento que assume o aspecto da figura 7. Temos, portando, uma reta e sobre esta é feita uma regressão linear para que sejam determinados os seus coeficientes. Com a equação da reta assim determinada calcula-se o tempo a que corresponde o valor de -60 dB. Este é o tempo de reverberação.

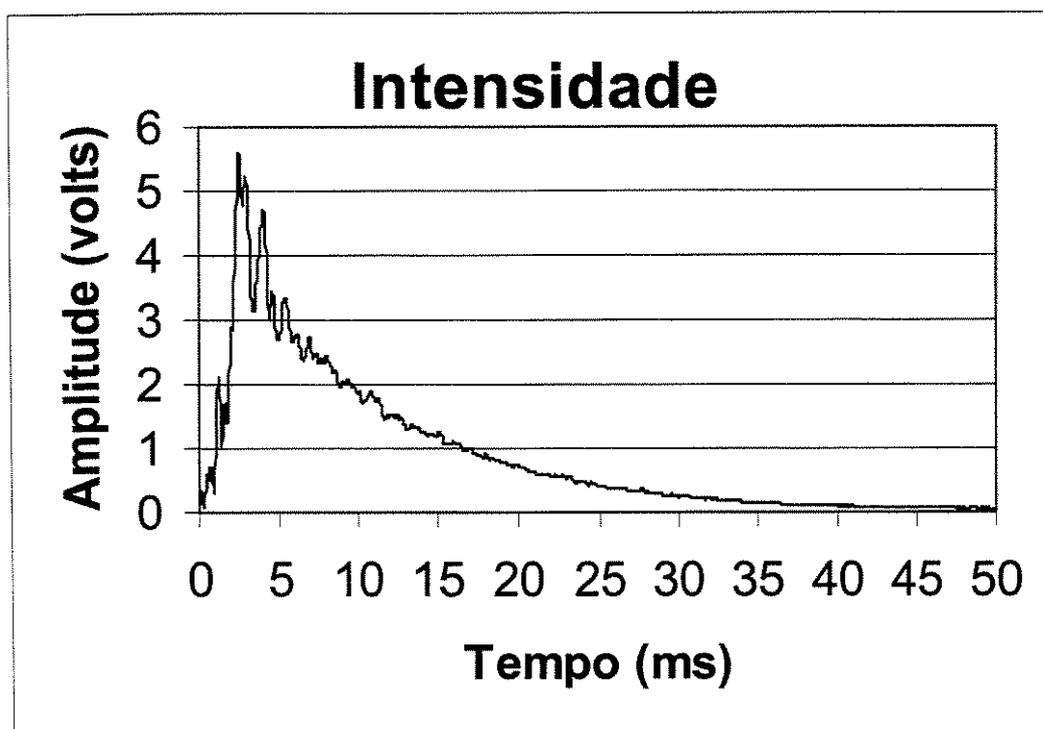


Figura 5 : Forma de onda do decaimento

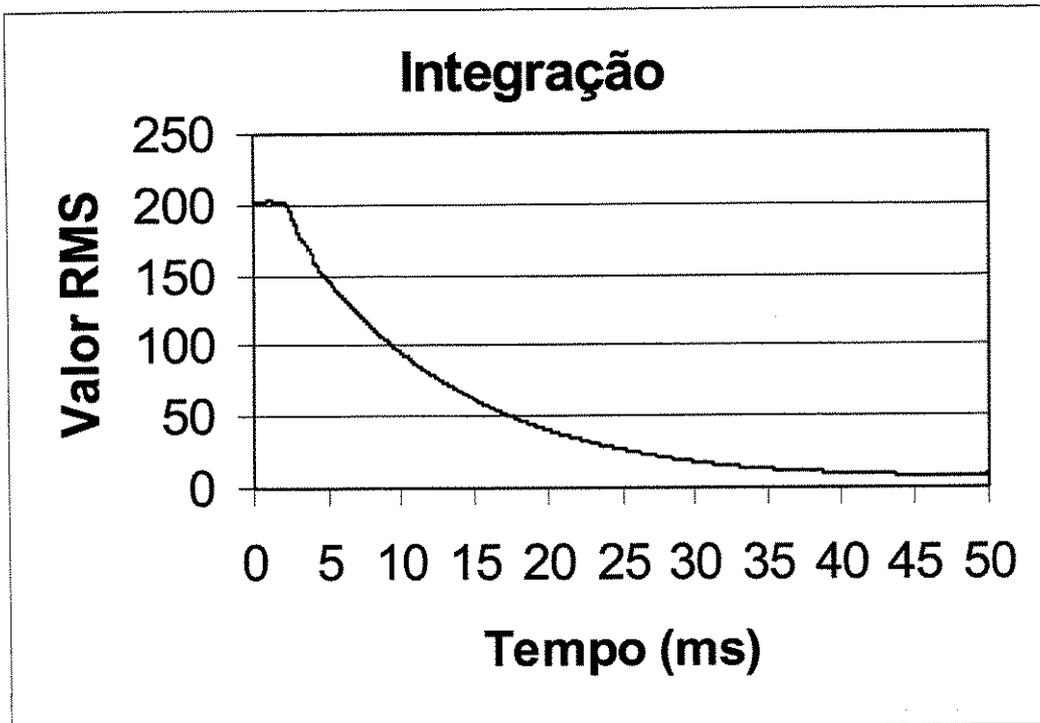


Figura 6 : Decaimento em RMS

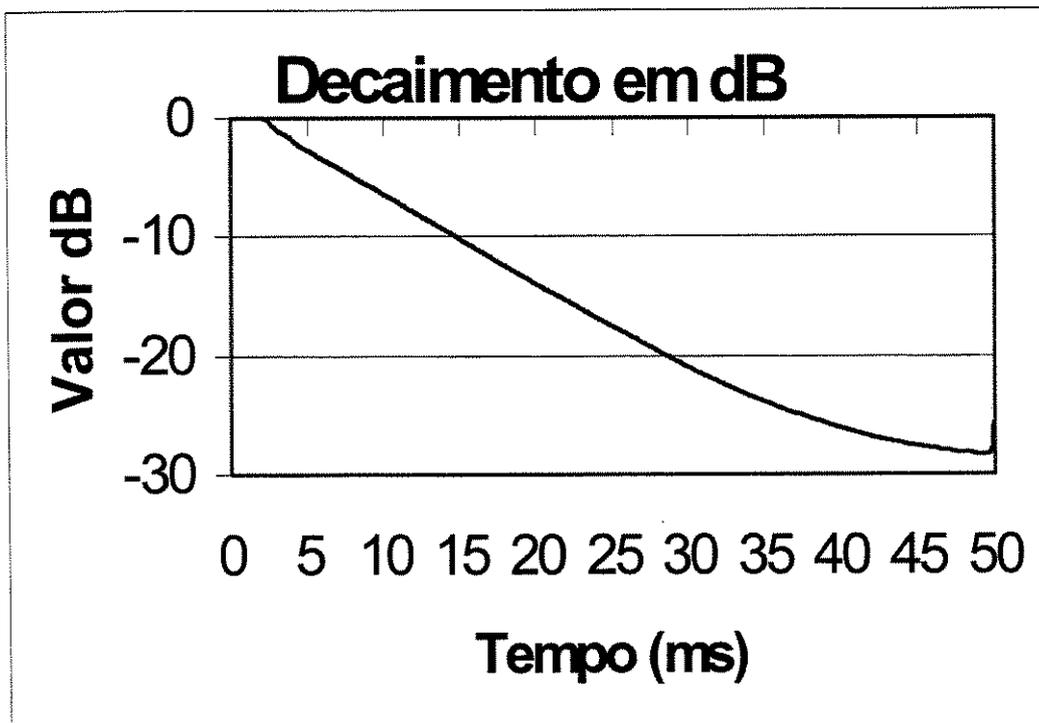


Figura 7 : Apresentação dos valores em dB

O número de pontos utilizados na digitalização da forma de onda no osciloscópio tem pouca influência no resultado final. Isto ocorre porque o sinal amostrado já é a envoltória do sinal que chega do receptor, correspondendo a uma curva suave de decaimento exponencial. A maioria dos experimentos foram feitos com 1000 pontos de aquisição.

Os cálculos foram executados de forma automatizada no Microsoft® Excel, sendo implementada uma subrotina em *visual basic* para o cálculo do tempo de reverberação em vários níveis de líquido. A figura 8 mostra a seqüência de cálculos e as fórmulas utilizadas para se calcular o tempo de reverberação correspondente a um determinado volume.

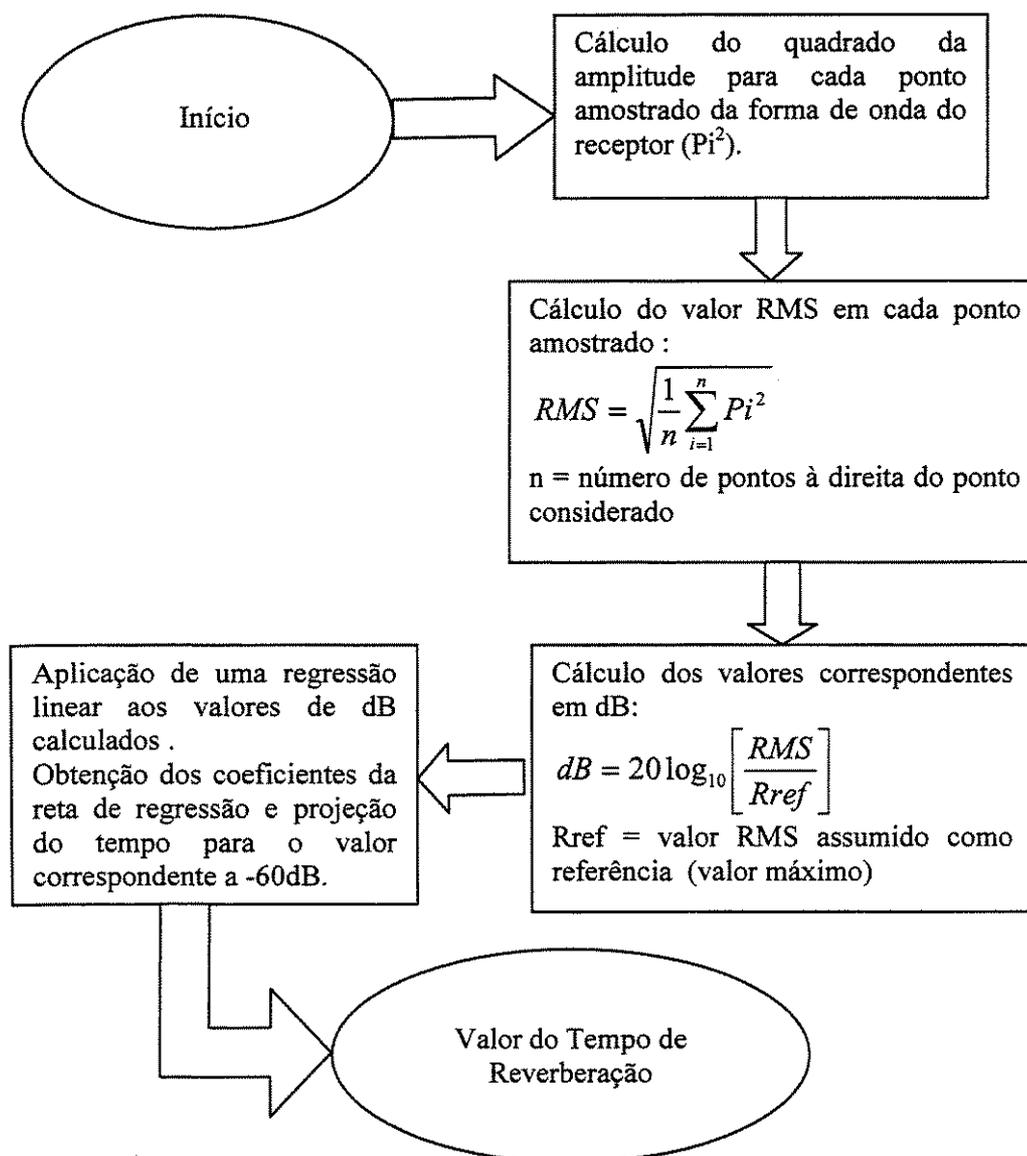


Figura 8: Metodologia de cálculo

IV-Circuito de aquisição

O sinal produzido no transdutor receptor precisa passar por um circuito de condicionamento para que a informação referente ao decaimento da potência sonora possa ser extraída. Este circuito deve eliminar ruídos, amplificar o sinal referente ao decaimento e fazer a detecção da sua envoltória. Um diagrama em blocos do circuito é mostrado na figura 9 e no Anexo I é apresentado o diagrama esquemático do circuito utilizado.

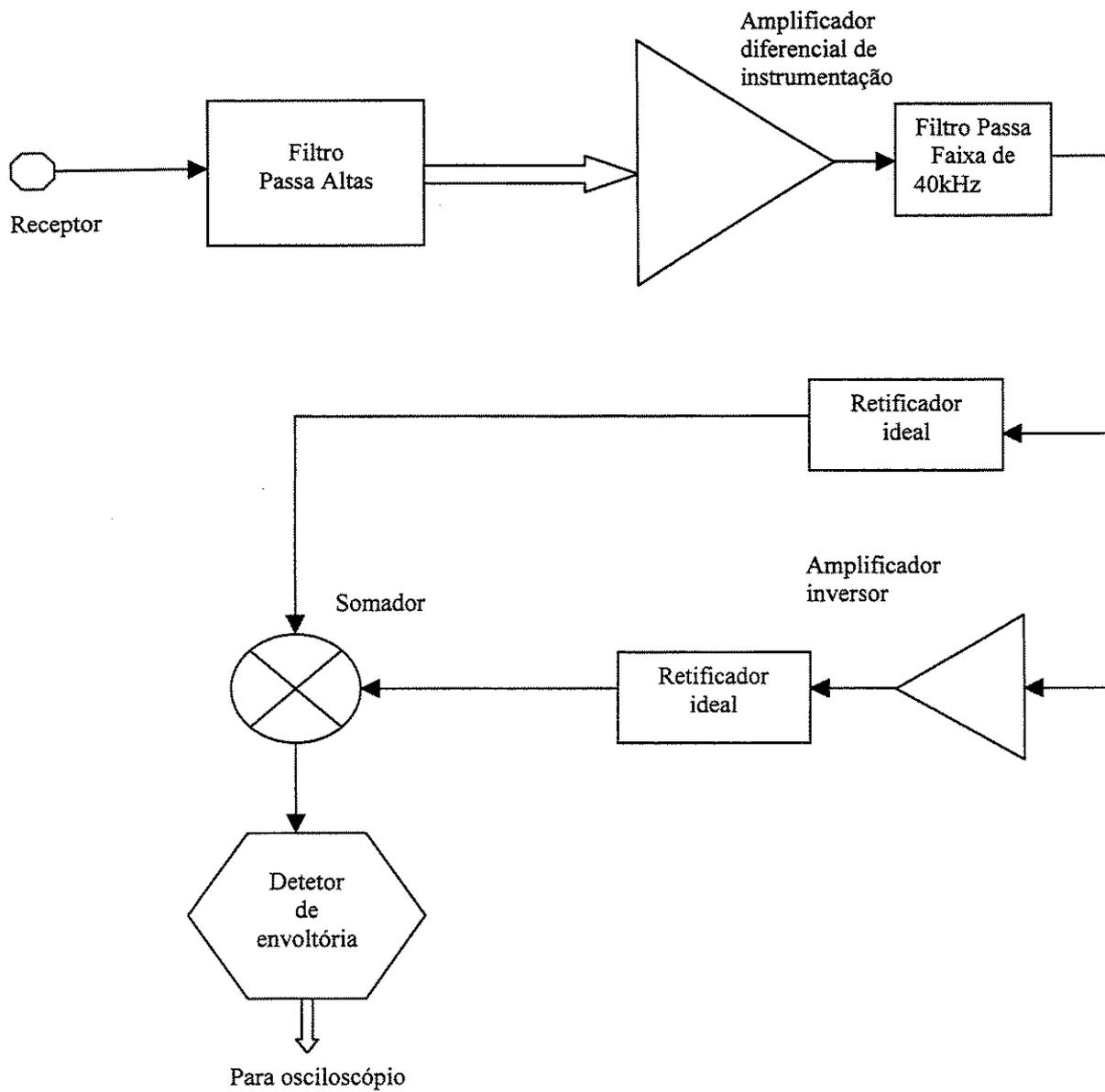


Figura 9 : Diagrama em blocos do circuito de condicionamento

Filtro passa altas

Circuito que bloqueia as frequências abaixo de 100Hz, desta forma grande parte do ruído em baixa frequência é eliminado e a interferência da rede em 60 Hz é cortada impedindo que o estágio posterior de alto ganho sature.

Na entrada do circuito existe um conjunto de resistores que efetuam o casamento de impedância do circuito com o transdutor. Além disso, servem como supressores da tensão DC que se origina no transdutor, evitando assim que o nível do sinal varie ao longo do tempo.

Amplificador de instrumentação

Este circuito amplifica o sinal de forma diferencial afim de eliminar o ruído em modo comum. O ganho do amplificador é bastante alto, variando entre 500 e 5000. É importante que este ganho seja variável, pois dependendo das condições da medida o ganho deve ser ajustado afim de se evitar a saturação do sinal.

Filtro passa faixa de 40 kHz

O filtro passa faixa sintonizado em 40 kHz, que é a frequência de operação dos transdutores do sistema, elimina praticamente todos os sinais espúrios e de ruído que passaram pelo amplificador diferencial. Isto faz com que o sinal obtido na saída do filtro seja composto quase que unicamente do sinal de resposta do receptor ao impulso ultra-sônico, melhorando em muito a confiabilidade da medida. O sinal na saída deste circuito é apresentado na figura 10, onde se vê que o sinal é composto de uma parte com valor negativo e outra com valor positivo.

Na operação do sistema em outras frequências, diferentes de 40 kHz, este filtro foi substituído por outro na frequência correspondente. Esta é a razão pela qual existem dois filtros separados : um passa altas antes do amplificador e outro passa faixa depois do amplificador.

Retificadores, inversor e somador

Estes blocos compõem um circuito retificador de onda completa, fazendo com que tanto a parte positiva do sinal quanto a parte negativa seja aproveitada para a composição do sinal final. Isto é importante na etapa posterior de detecção de envoltória, que assim fica com ondulações (*ripple*) bem menores em virtude da distância entre os picos do sinal serem reduzidas pela metade, uma vez que a parte positiva do sinal se apresenta defasada em meio ciclo da parte negativa.

Detetor de envoltória

O circuito detetor de envoltória, que compreende circuitos de filtro passa baixa de constante de tempo de 1ms, discrimina a parte do sinal que efetivamente compõe a informação que se refere ao decaimento exponencial, ou seja, a amplitude dos picos. Desta maneira, a forma de onda entregue no final do circuito é uma composição dos valores máximos de sinal ao longo do tempo que são captados pelo receptor, sendo uma expressão direta da pressão sonora presente no recipiente num dado instante.

Ao final deste estágio o sinal apresenta o aspecto mostrado na figura 11 onde pode-se observar um decaimento exponencial médio dos picos de amplitude.

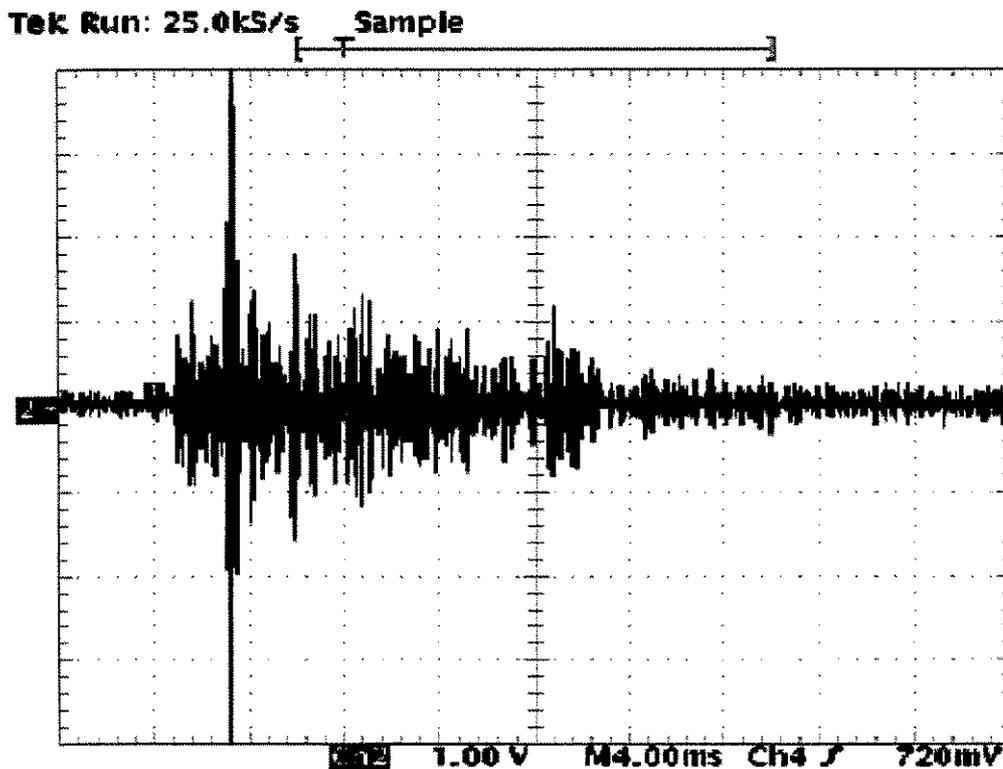


Figura 10 : Sinal na saída do filtro passa faixa

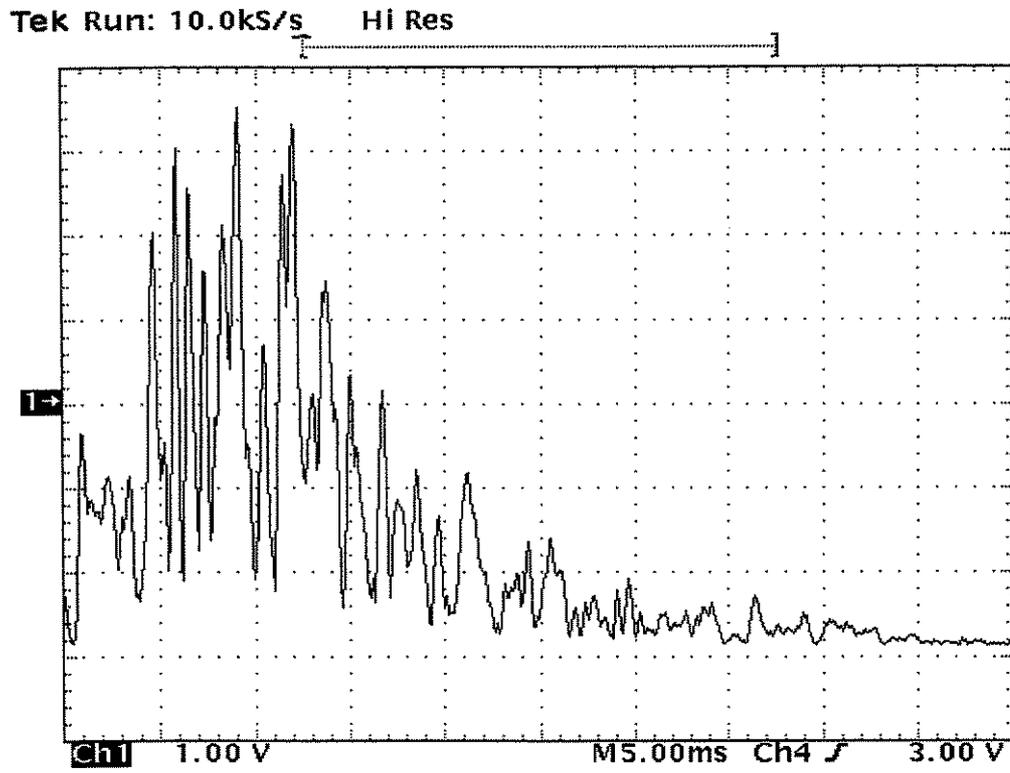


Figura 11: Sinal na saída do detetor de envoltória

V – Procedimento Experimental

Objetivos

Buscou-se o estabelecimento de uma metodologia para a medida do tempo de reverberação que pudesse ser facilmente aplicável a um sistema embarcado de baixo custo, e ao mesmo tempo, fizesse uso dos recursos disponíveis. A evolução desta metodologia orientou-se no sentido de se conseguir a reprodutibilidade e a precisão dos resultados.

O desenvolvimento da metodologia se deu através de medições experimentais. Por meio da variação de alguns fatores que influenciam no resultado das medidas obtidas, procurou-se obter informações sobre o comportamento físico do sistema.

Os principais fatores investigados foram :

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| -agitação do líquido | -características das superfícies |
| -características dos transdutores | -frequência de operação |
| -posicionamento dos transdutores | -variação volumétrica |

Descrição dos experimentos

As medidas foram baseadas na determinação do tempo de reverberação para diversos níveis de preenchimento do reservatório, portanto diversos volumes. A variação do volume para as medidas se deu através do acréscimo de água ao recipiente, com o reservatório sendo preenchido até o volume máximo desejado e então sendo esvaziado de forma controlada com o auxílio de uma bomba elétrica.

Para cada volume foram adquiridas várias formas de onda correspondentes a instantes subsequentes e obtida uma média simples para cada ponto amostrado. Embora em alguns casos isto tenha sido feito manualmente, na maioria das vezes foi utilizada a média obtida no osciloscópio digital o que permitiu efetuar cálculos com um número muito maior de amostragens.

As características do sinal aplicado ao transmissor (figura 4) foram :

- amplitude = 10 Vpp
- número de pulsos aplicados = 5
- frequência de excitação = 40 kHz, onda quadrada
- frequência de repetição dos pulsos = 10 Hz

Esta configuração de sinal de excitação foi a que apresentou melhores resultados, comprovado por meio de diversas tentativas, procurando compatibilizar o sinal de resposta com os equipamentos e circuito de aquisição utilizados.

Como a cada pulso do transmissor corresponde uma forma de onda de resposta, e a frequência do sinal de pulsos é de 10 Hz, em poucos segundos é possível se fazer um grande número de aquisições. A medida final é feita a partir de uma forma de onda composta no osciloscópio digital pela média obtida de pelo menos 100 aquisições.

As medidas foram feitas utilizando-se água em vez de combustível no reservatório, variando desde 20 litros (10 litros em alguns casos) até a situação de vazio, em situação de repouso e em agitação.

Metodologia de análise

Foram executadas diversas medidas em diferentes condições do sistema, de modo que a influência de cada um dos fatores investigados sobre o resultado da medida do tempo de reverberação pudesse ser verificada experimentalmente.

Afim de possibilitar uma análise mais precisa dos dados obtidos foi deduzida uma equação a partir da regressão linear dos valores do tempo de reverberação para diversos volumes. Este desenvolvimento permite que se encontrem duas constantes que fornecem informações sobre o comportamento do sistema²¹.

Da equação de Sabine :

$$R_T = \frac{0.16V}{4mV + \sum \alpha_i S_i} \quad [IV.1]$$

A absorvidade total sendo dada por :

$$\sum S_i \alpha_i = S_l \alpha_l + S_t \alpha_t + S_{H_2O} \alpha_{H_2O} \quad [V.2]$$

- o índice l representa a superfície lateral do recipiente
- o índice t a superfície superior
- o índice H_2O a superfície do líquido, no caso a água

Logo :

$$\frac{1}{R_T} = \frac{4mV}{0.16V} + \frac{S_l \alpha_l}{0.16V} + \frac{S_t \alpha_t}{0.16V} + \frac{S_{H_2O} \alpha_{H_2O}}{0.16V} \quad [IV.3]$$

Como as experiências foram feitas com um recipiente cilíndrico de alumínio podemos escrever para as superfícies :

$$\begin{aligned}
 S_i &= 2\pi r h \\
 S_{H_2O} &= S_i = \pi r^2 \\
 h &= \frac{V}{\pi r^2}
 \end{aligned}
 \tag{IV.4}$$

Substituindo em IV.3 :

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{R_T} &= \frac{4m}{0.16} + \frac{2\pi r h \alpha_i}{0.16V} + \frac{\pi r^2 \alpha_i}{0.16V} + \frac{\pi r^2 \alpha_{H_2O}}{0.16V} \\
 \frac{1}{R_T} &= 25m + \frac{12.5}{r} \alpha_i + \frac{1}{V} \frac{\pi r^2}{0.16} (\alpha_i + \alpha_{H_2O})
 \end{aligned}
 \tag{IV.5}$$

Definimos :

$$A = \frac{\pi r^2}{0.16} (\alpha_i + \alpha_{H_2O})
 \tag{IV.6}$$

$$B = 25m + \frac{12.5}{r} \alpha_i
 \tag{IV.7}$$

$$\boxed{\frac{1}{R_T} = \frac{A}{V} + B}
 \tag{IV.8}$$

Desta maneira, temos que o coeficiente A está relacionado com o coeficiente de absorção da superfície superior, no caso a tampa do recipiente, e também com a superfície do líquido. O coeficiente B , por sua vez, relaciona-se com o coeficiente de absorção da superfície lateral e também com o coeficiente de atenuação do som no ar.

Os coeficientes também apresentam uma dependência com as características geométricas do recipiente, como mostram as equações IV.6 e IV.7. Logo, para cada recipiente teremos novas equações para A e B . Na equação IV.8 vemos que os coeficientes A e B correspondem aos coeficientes da reta que relaciona a variável $1/R_T$ com o inverso do volume $1/V$. Assim, através da medida do tempo de reverberação para diversos volumes, podemos determinar os valores dos coeficientes A e B para um dado recipiente. Sendo estes coeficientes conhecidos, podemos medir o tempo de reverberação e determinar o volume correspondente.

Nos experimentos realizados, as medições se constituíram de uma seqüência de medidas para vários níveis. Para quantificar o resultado da medida foi definido o parâmetro D que representa a proporção de medidas que apresentam um resultado cujo desvio ultrapassa $\pm 0,5$ l.

$$D = \frac{n_{0,5}}{N}$$

$n_{0,5}$ = número de medidas cujo desvio está fora do intervalo $[-0,5, 0,5]$

N = número total de medidas da seqüência

Tabela 1 : Medidas com e sem agitação

1b - Medidas com agitação :

	Constante A	Constante B	Coef. Correl.	Parâmetro D
	0,0865	5,3268	0,9975	0,35
	0,0827	5,0681	0,9969	0,20
	0,0799	4,9603	0,9943	0,40
	0,0708	5,2751	0,9878	0,70
	0,0755	4,8377	0,9988	0,50
Média :	0,0791	5,0936	0,9951	0,43
Desvio padrão %:	7,76	4,06	0,44	43,20

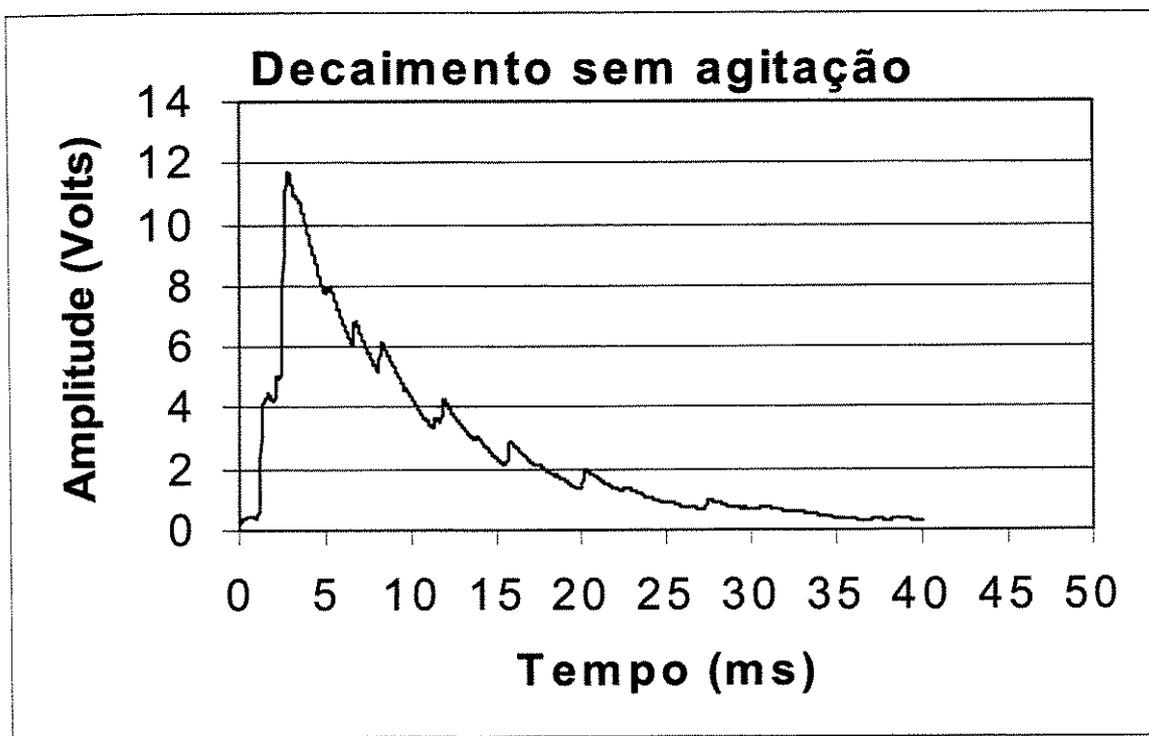


Figura 12 : Decaimento da amplitude sem agitação

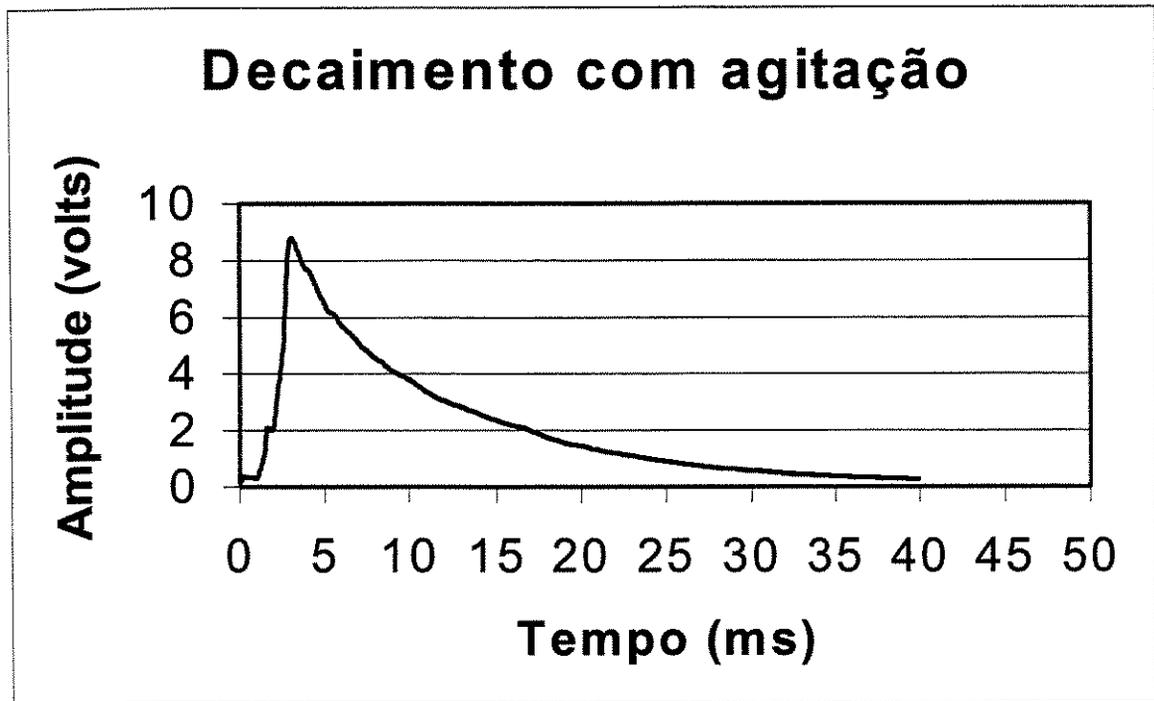


Figura 13 : Decaimento da amplitude com agitação

Tipos de transdutores

A dependência da medida do tempo de reverberação com o tipo de transdutor utilizado foi investigada, entre outros, por Mastracco e Sneek²². Neste trabalho ficou demonstrada a dependência do tempo de reverberação medido em uma sala de concertos com o tipo de microfone utilizado.

As características de resposta polar e diferente *design* interno dos transdutores podem influenciar sobre a resposta elétrica ao campo sonoro e, no caso do transmissor, como a fonte sonora é modificada, influenciar nas características do campo sonoro produzido, como a difusidade, e desta forma modificar os valores medidos para o tempo de reverberação. Foram feitas algumas modificações nos transdutores usados no sistema para tornar o som produzido menos direcional e assim aumentar a difusidade. Também foram testados alguns tipos diferentes de transdutores.

As principais alterações efetuadas são mostradas a seguir e os resultados mais significativos são apresentados na tabela 2 para medidas feitas na frequência de 40 kHz.

- Alterações :
- retirada da cobertura externa dos transdutores
 - utilização de um *buzzer* cerâmico como transdutor
 - utilização de alto falante como transmissor
 - utilização de um microfone de eletreto como receptor
 - emprego de um transdutor piezoelétrico de maior diâmetro (TR89).
 - colocação de um tubo frontal nos transdutores (RT40 e ST40)

Tabela 2: Valores obtidos com diversos transdutores

Transmissor	Receptor	Constante A	Constante B	Coef. Correl.
<i>buzzer</i>	RT40	0,1092	1,0419	0,92
TR89	RT40	0,1619	2,0178	0,69
<i>buzzer</i>	RT40*	0,1549	0,4728	0,89
ST40*	RT40*	0,1516	1,5236	0,97
<i>buzzer</i>	eletreto	-0,2470	28,1468	0,36
ST40*	eletreto	0,0644	-0,5840	0,60
<i>buzzer</i>	<i>buzzer</i>	-0,0046	3,2003	0,50
ST40**	RT40**	0,0738	5,7452	0,99

* indica transdutor sem cobertura

** indica transdutor com tubo frontal

As figuras 14 a 21 mostram os valores obtidos do tempo de reverberação em diversos níveis (1 a 10 litros) para cada combinação de transdutores. O volume apresentado nestes e nos gráficos seguintes, a menos que indicado, se referem ao volume da parte vazia dentro do recipiente.

Os valores negativos encontrados para as constantes são fisicamente inaceitáveis porque no caso da constante *B*, indicariam a existência de uma reflexão maior que 100% na superfície lateral do recipiente e no caso da constante *A*, uma dependência inversa do tempo de reverberação com o volume. Estes valores correspondem, portanto, a uma situação em que a equação da reverberação não pode ser aplicada.

Os valores encontrados para as constantes *A* e *B* diferem bastante de um sistema para o outro, comprovando a influência do tipo de transdutor sobre o valor das medidas. O melhor valor de correlação e também de desvio médio (figura 21) é obtido com o uso do tubo frontal nos transdutores, o comprimento deste tubo não influencia no resultado final, mas seu diâmetro interno deve ser da ordem de grandeza do comprimento de onda (~8,5mm). Medidas posteriores comprovaram a reprodutibilidade destes resultados, apresentando-se esta combinação como sendo a mais adequada para este tipo de medida.

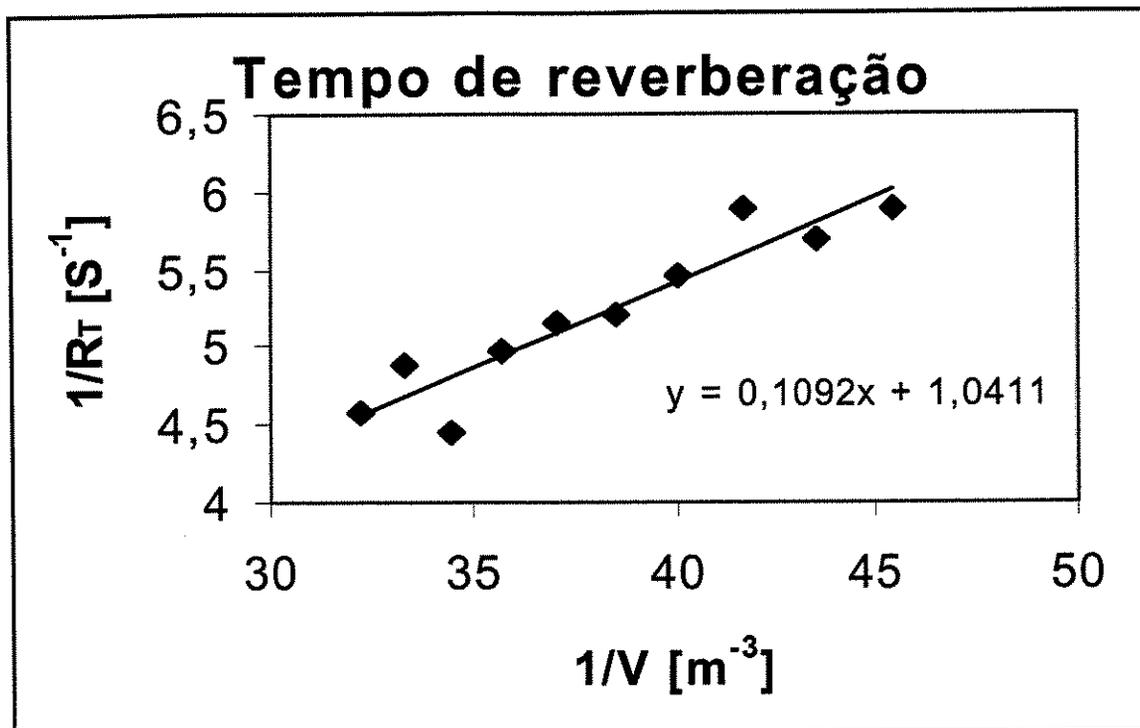


Figura 14 – Transmissor: *buzzer*
Receptor: RT40

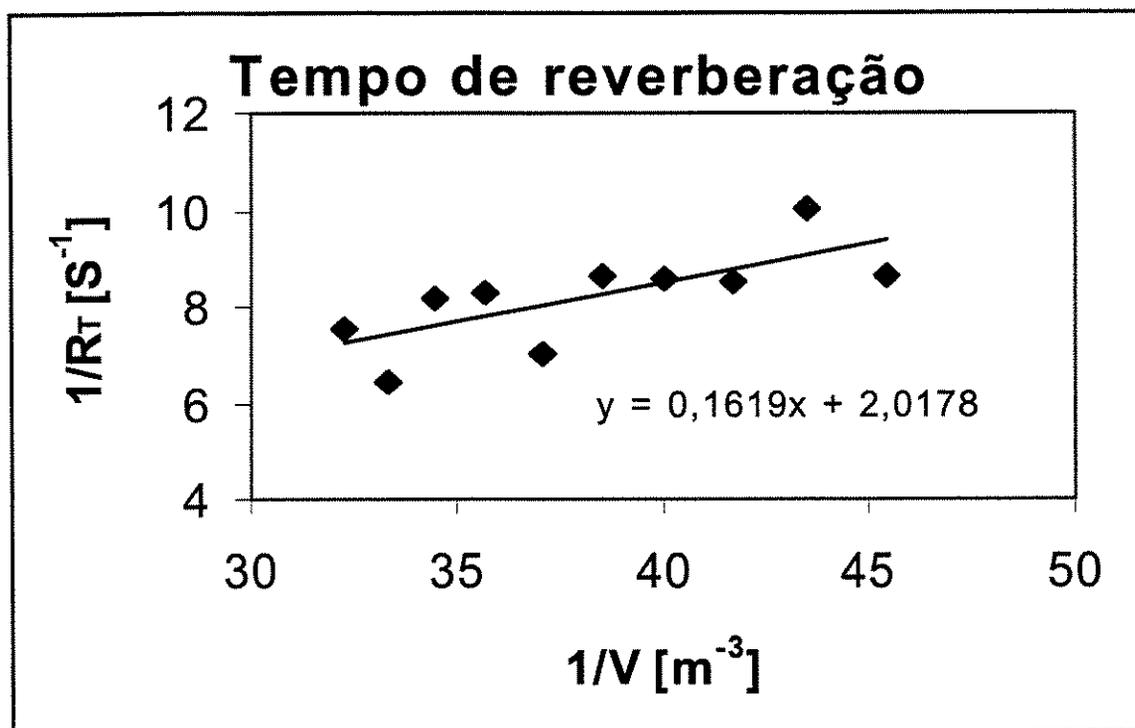


Figura 15 – Transmissor: TR89
Receptor: RT40

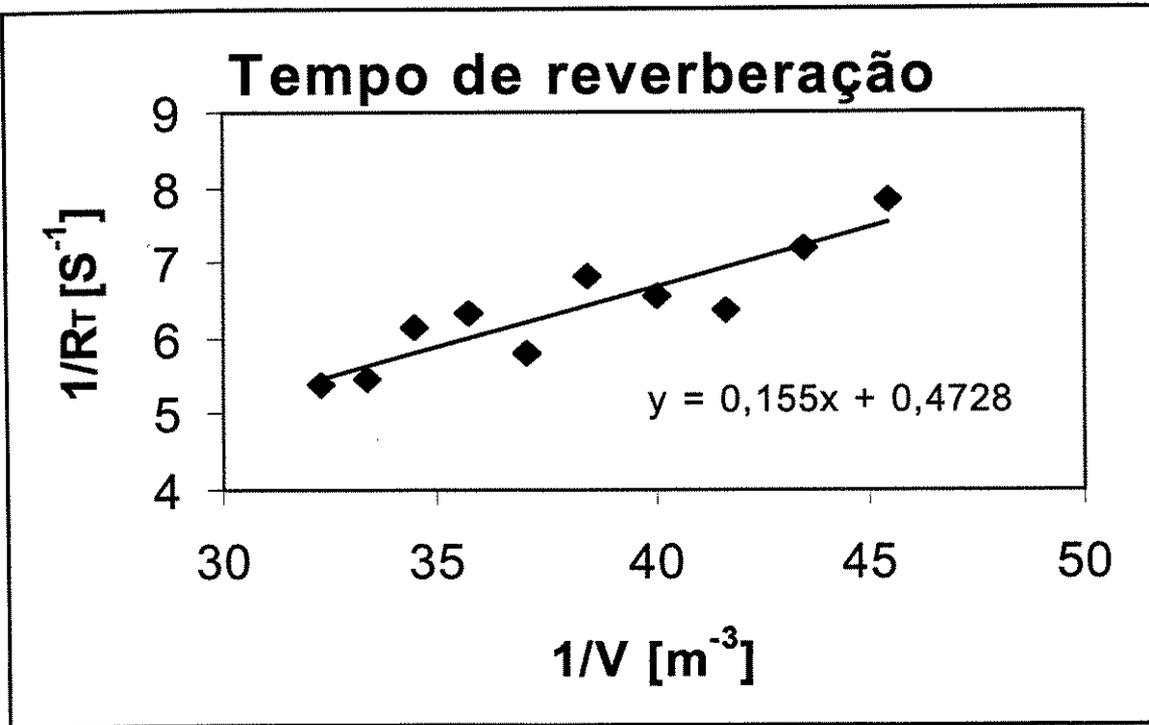


Figura 16 – Transmissor : *buzzer*
Receptor : RT40 sem cobertura

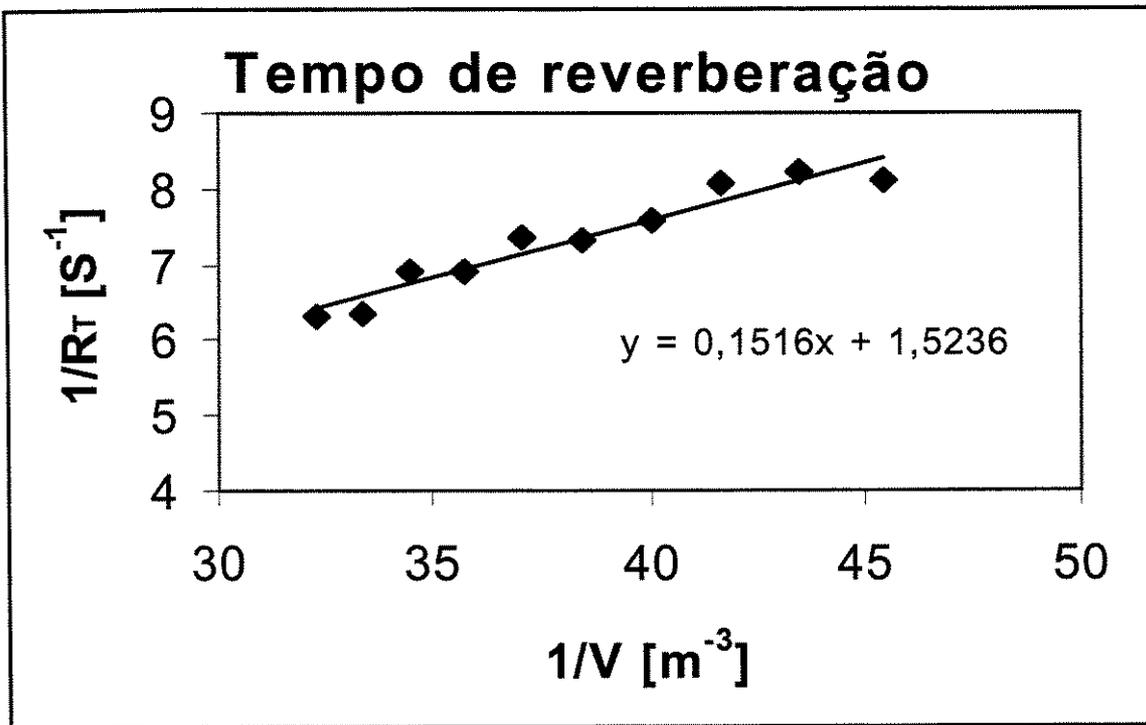


Figura 17 – Transmissor : ST40 sem cobertura
Receptor : RT40 sem cobertura

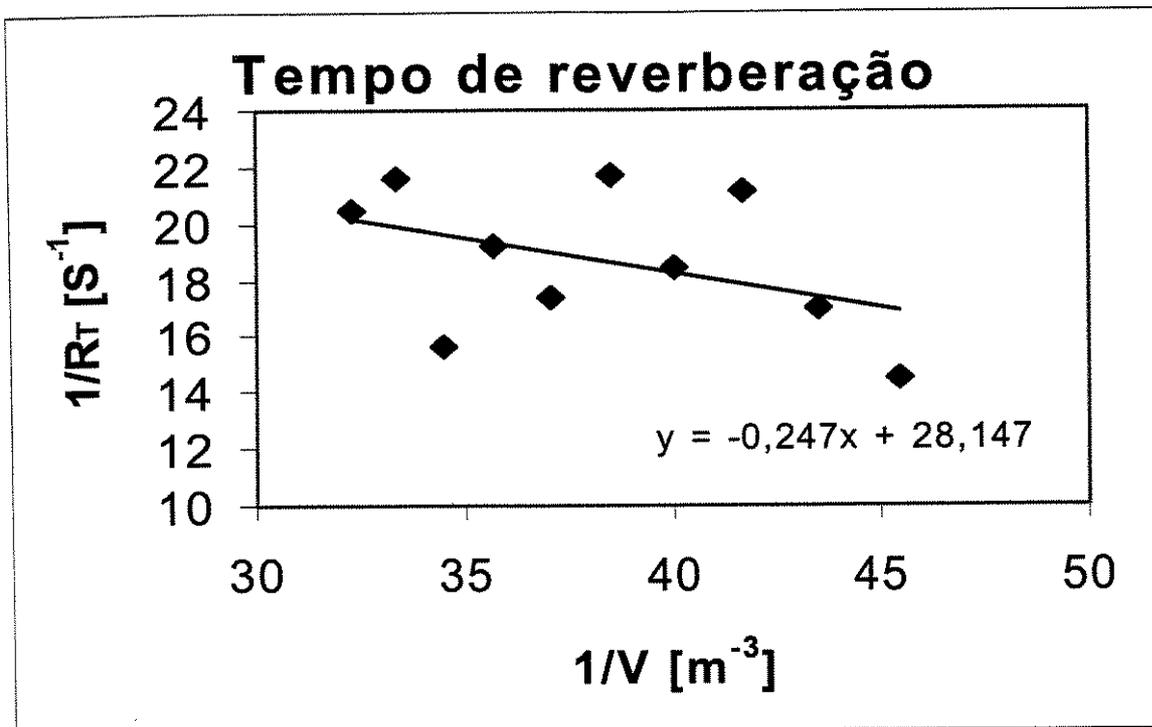


Figura 18 - Transmissor : *buzzer*
 Receptor : microfone eletreto

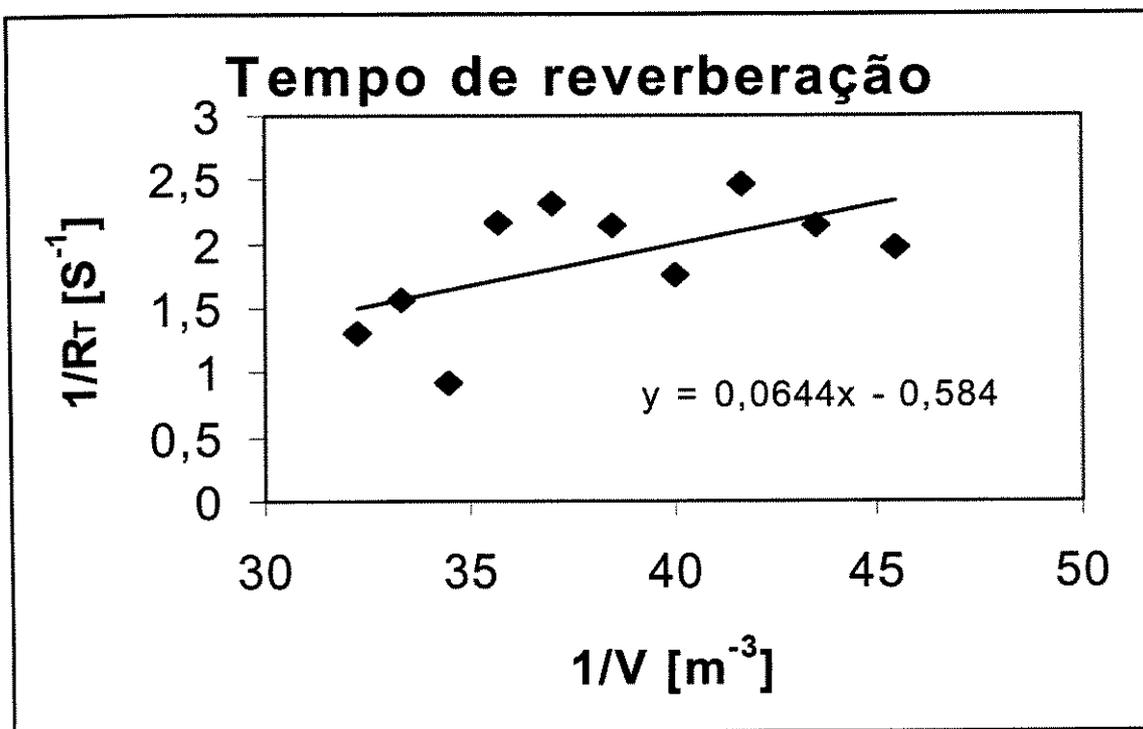


Figura 19 – Transmissor : ST40 sem cobertura
 Receptor : microfone eletreto

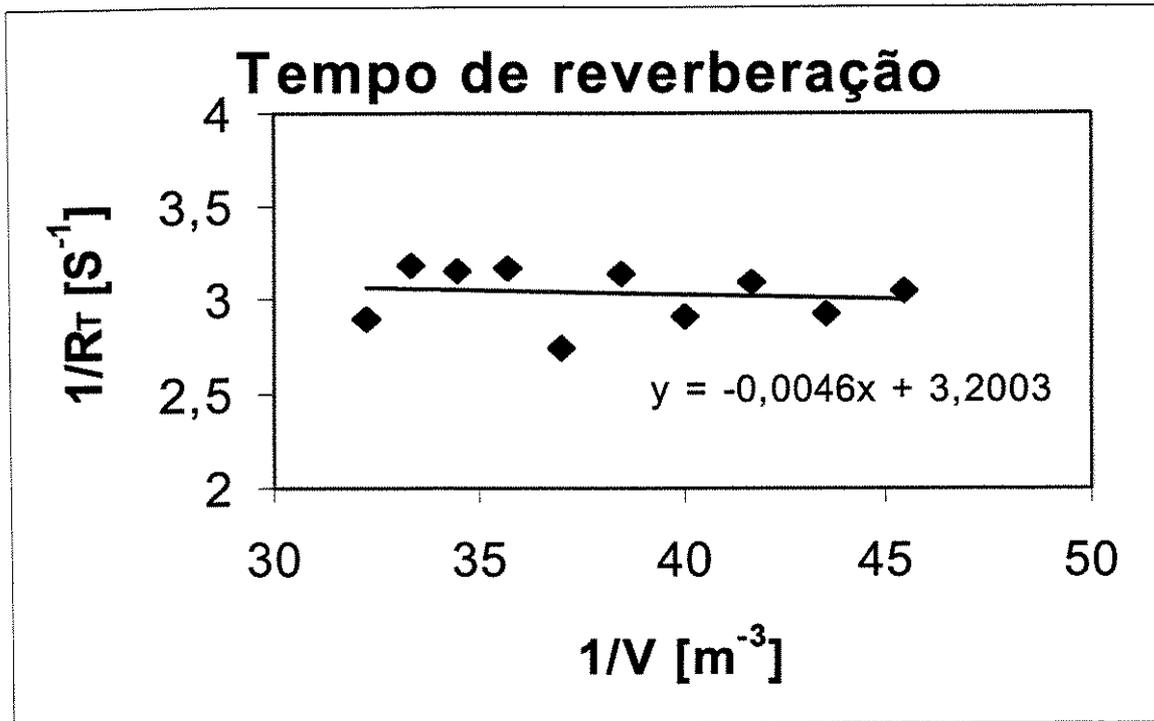


Figura 20 – Transmissor : *buzzer*
Receptor : *buzzer*

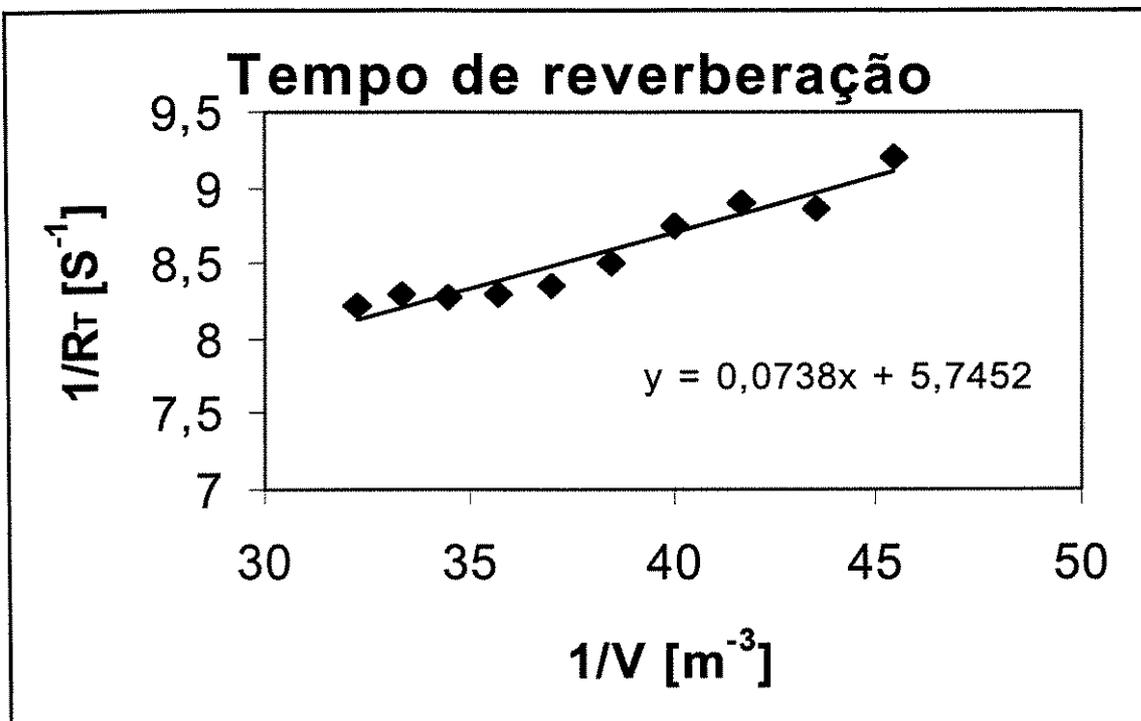


Figura 21- Transmissor: ST40 com tubo frontal
Receptor: RT40 com tubo frontal

Posicionamento dos sensores

A posição e a orientação dos transdutores podem afetar a medida do tempo de reverberação²³. A posição do transmissor afeta a distribuição da potência sonora irradiada e, desta forma, o campo sonoro dentro do recipiente. Além disso, no caso do campo sonoro não ser totalmente difuso, a variação das medidas do tempo de reverberação, conforme os transdutores mudam de posição, não serão devidas apenas às mudanças introduzidas pelos transdutores mas também devido às diferenças de intensidade medidas de um ponto para o outro do ambiente.

A variação da posição dos transdutores pode revelar assim não apenas o quanto isto afeta as medidas mas também o quanto o campo sonoro é difuso dentro do ambiente. Efetuamos a medida do tempo de reverberação referente ao volume de 1 litro de água dentro do recipiente para diversas posições dos transdutores : afixados na parte superior do recipiente (tampa), diametralmente opostos e em várias posições relativas.

A figura 22 apresenta os resultados no caso dos transdutores utilizados serem os transdutores do alarme (RT40 e ST40) e a figura 23 apresenta os resultados obtidos para o caso em que se utiliza transdutores do tipo *buzzer* cerâmico. A variação nos valores é menor para o caso do *buzzer*, além de apresentar também maior linearidade. As medidas efetuadas com os transdutores do alarme denotam claramente uma região onde o valor do tempo de reverberação observado sofre uma grande alteração, chegando a triplicar de valor. Isto, por si só, permite afirmar que a posição deste tipo de transdutores pode ter grande influência no valor medido, sugerindo a presença de um campo sonoro com regiões de diferentes intensidades.

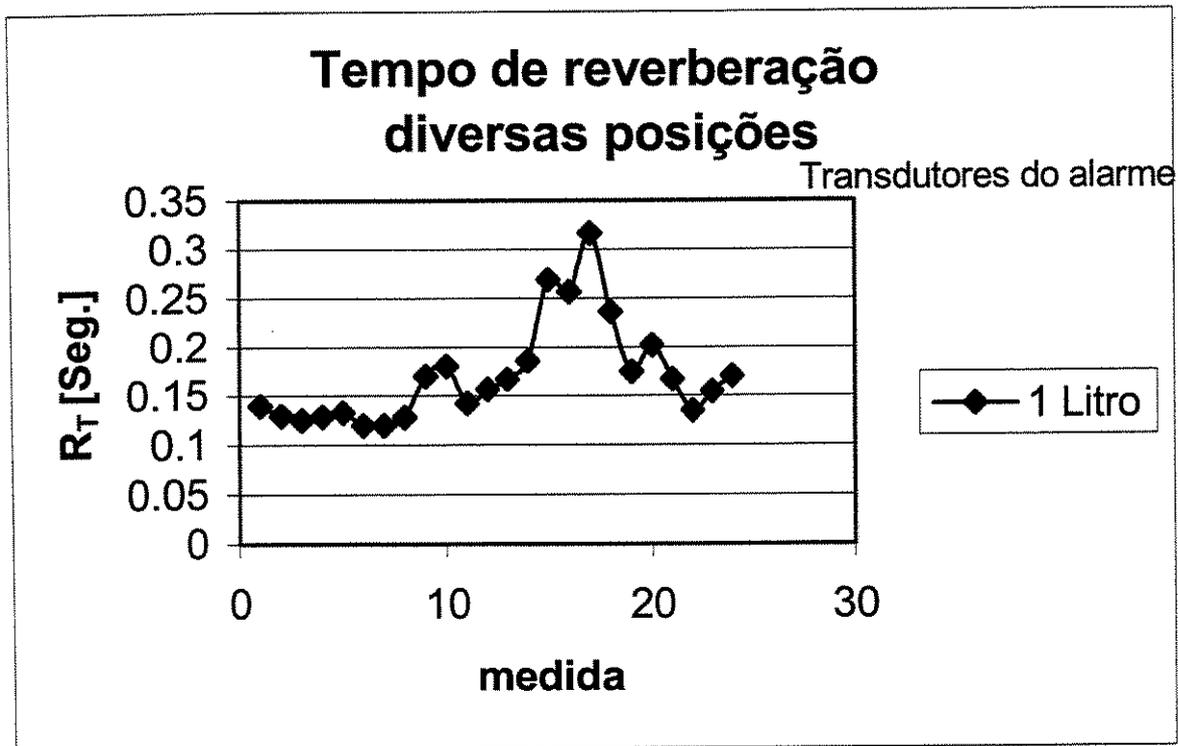


Figura 22 : Medições em diversas posições

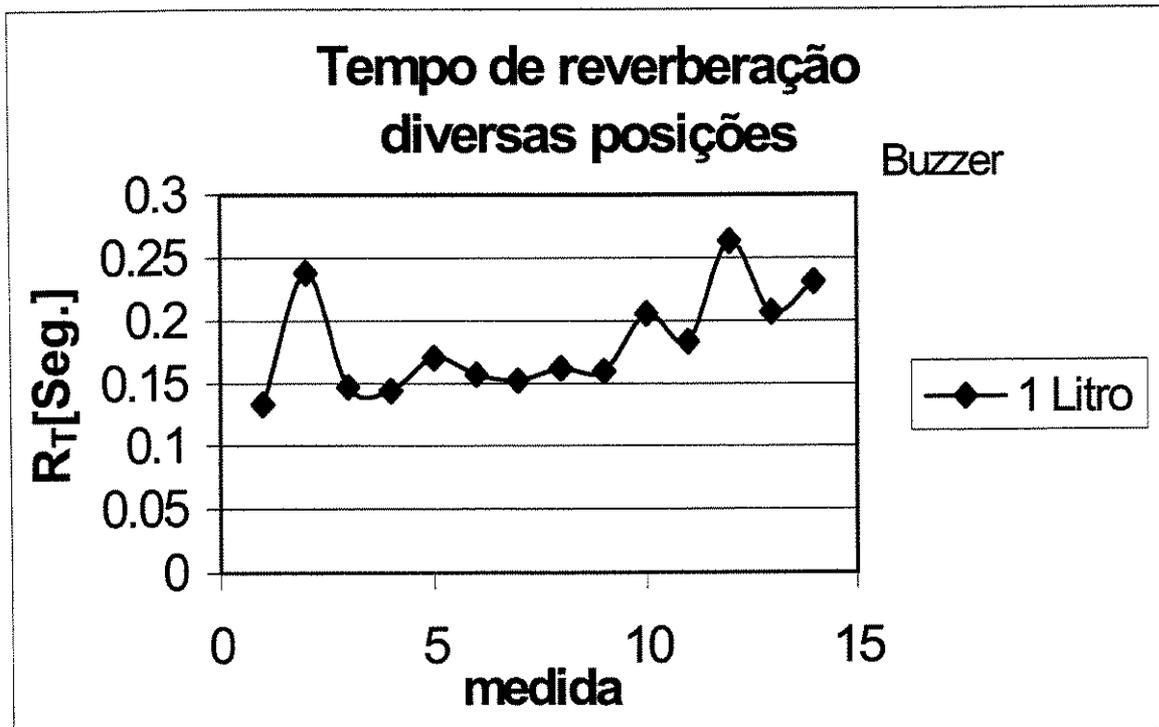


Figura 23 : Medições em diversas posições - buzzer

Difusor interno

Algumas modificações foram introduzidas no sistema afim de produzir um campo sonoro mais difuso e assim melhorar os resultados. Dentre elas a mais investigada foi a colocação de uma tela de aço inoxidável perfurada com furos circulares de 2cm de diâmetro no interior do tanque. A tela foi colocada na superfície lateral interna do cilindro guardando uma certa distância da parede do mesmo. Estes furos, de largura próxima ao comprimento de onda do som em 40 kHz (0,85 cm), podem provocar difração nas ondas sonoras e assim difundi-las melhor em todas as direções.

A tabela 3 apresenta um conjunto de valores obtidos com e sem a colocação da tela. A presença da tela não melhorou significativamente os resultados, como era esperado. Na verdade, os valores obtidos com o uso da tela foram piores que os obtidos sem o uso da mesma. Exceção feita para a constante A , que não está relacionada com a superfície lateral onde a tela é colocada, as medidas feitas com o uso da tela apresentam um desvio padrão maior que as feitas sem a tela.

O desvio para o parâmetro D também foi maior sem o uso da tela, mas seu valor médio foi menor. O desvio maior nesse caso, indica uma variação maior das medidas.

A constante A permaneceu praticamente inalterada com a colocação da tela enquanto a constante B , que está relacionada a superfície lateral, aumentou de valor denotando uma maior absorção na superfície.

Tabela 3 : Uso do difusor interno				
3a-Valores com tela :				
	Constante A	Constante B	Coef. Correl.	Parâmetro D
	0,0637	8,7659	0,9438	0,60
	0,0642	7,3211	0,8638	0,60
	0,0605	8,3987	0,8414	0,90
	0,0580	10,8869	0,9318	0,65
	0,0840	6,9323	0,9023	0,70
Média :	0,0661	8,4610	0,8966	0,69
Desvio padrão %:	15,64	18,33	4,87	18,04

Tabela 3 : Uso do difusor interno				
3b-Valores sem tela :				
	Constante A	Constante B	Coef. Correl.	Parâmetro D
	0,0810	5,9757	0,9829	0,65
	0,0563	5,8881	0,9753	0,75
	0,0822	5,4067	0,9906	0,30
	0,0461	6,7894	0,9325	0,65
	0,0661	5,5447	0,9493	0,60
Média :	0,0663	5,9209	0,9661	0,59
Desvio padrão %:	23,53	9,11	2,52	28,99

Alterações de frequência

É esperado que a frequência do pulso sonoro exerça influência sobre o valor do tempo de reverberação uma vez que tanto os coeficientes de absorção das superfícies como o coeficiente de atenuação do ar dependem da frequência¹³. Ao se efetuar algumas medidas em frequências diferentes de 40 kHz, pretendeu-se qualificar o quanto esta influência se fazia sentir na medida final do volume e ao mesmo tempo comprovar a eficácia da frequência escolhida.

As frequências para as medidas foram escolhidas de acordo com as características dos transdutores de forma a minimizar a influência de outros fatores sobre o resultado. Assim, a tabela 4 apresenta os resultados obtidos divididos em dois conjuntos de valores de acordo com o transdutor utilizado, os gráficos correspondentes a estes valores são apresentados nas figuras 24 a 29.

Alguns valores encontrados na tabela 4 são negativos, o que indica a ineficiência deste método quando operando naquela frequência e com estes transdutores.

Tabela 4: Valores obtidos com várias frequências				
Transmissor :	Frequência	Constante A	Constante B	Coef. Correl.
Alto-falante	6 kHz	0,4850	4,5000	0,27
Receptor :	8 kHz	0,0080	18,5024	0,38
eletreto	10 kHz	0,0187	17,1159	-0,19
Transmissor e	5 kHz	0,0564	3,5996	0,30
Receptor :	10 kHz	0,2405	-5,0021	0,75
buzzer	20 kHz	-0,0555	19,1859*	0,50

* o receptor utilizado nesta medida foi o microfone de eletreto

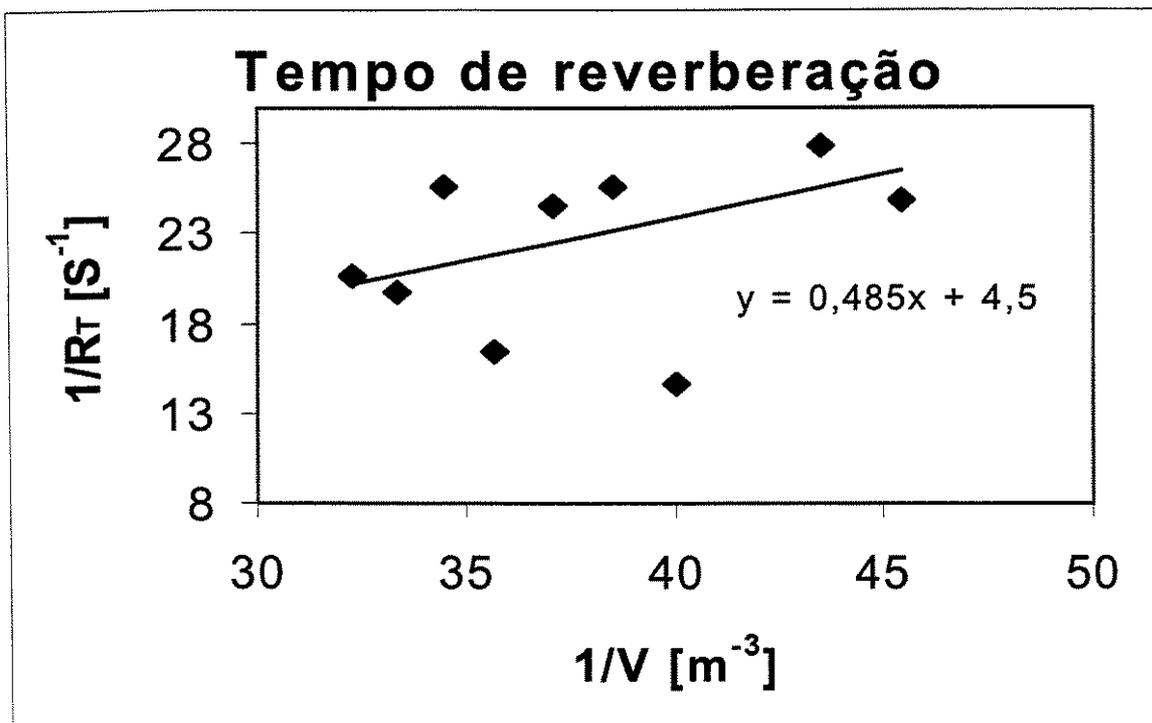


Figura 24 : Frequência de 6 kHz

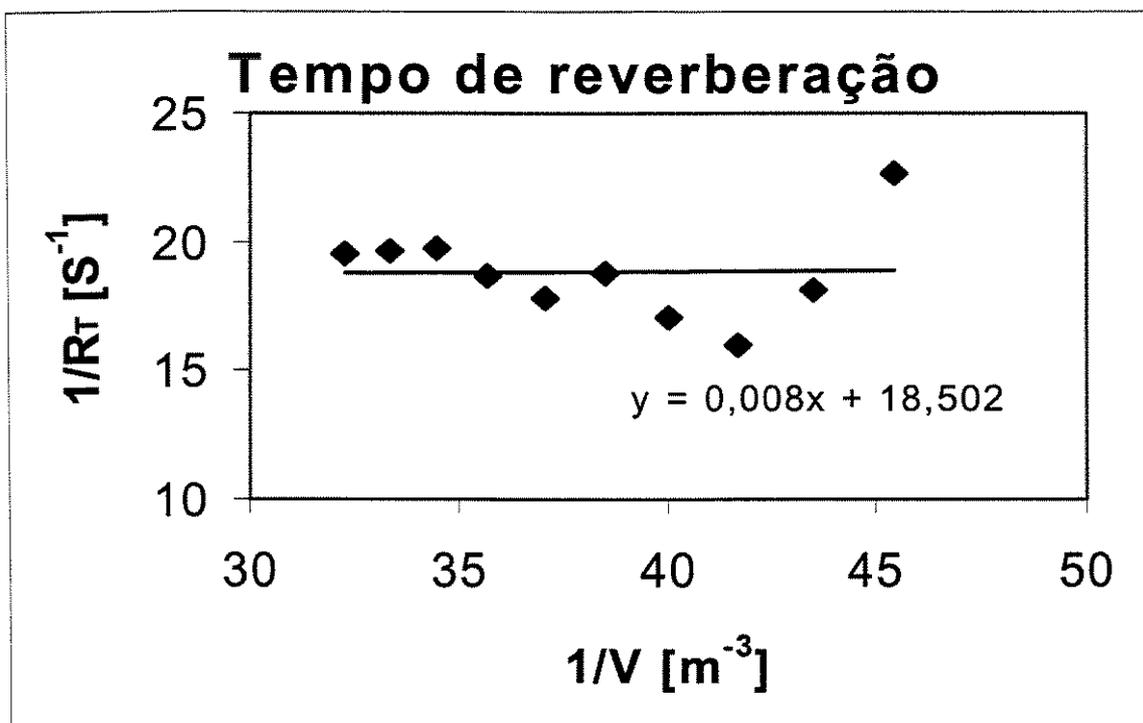


Figura 25 : Frequência de 8 kHz

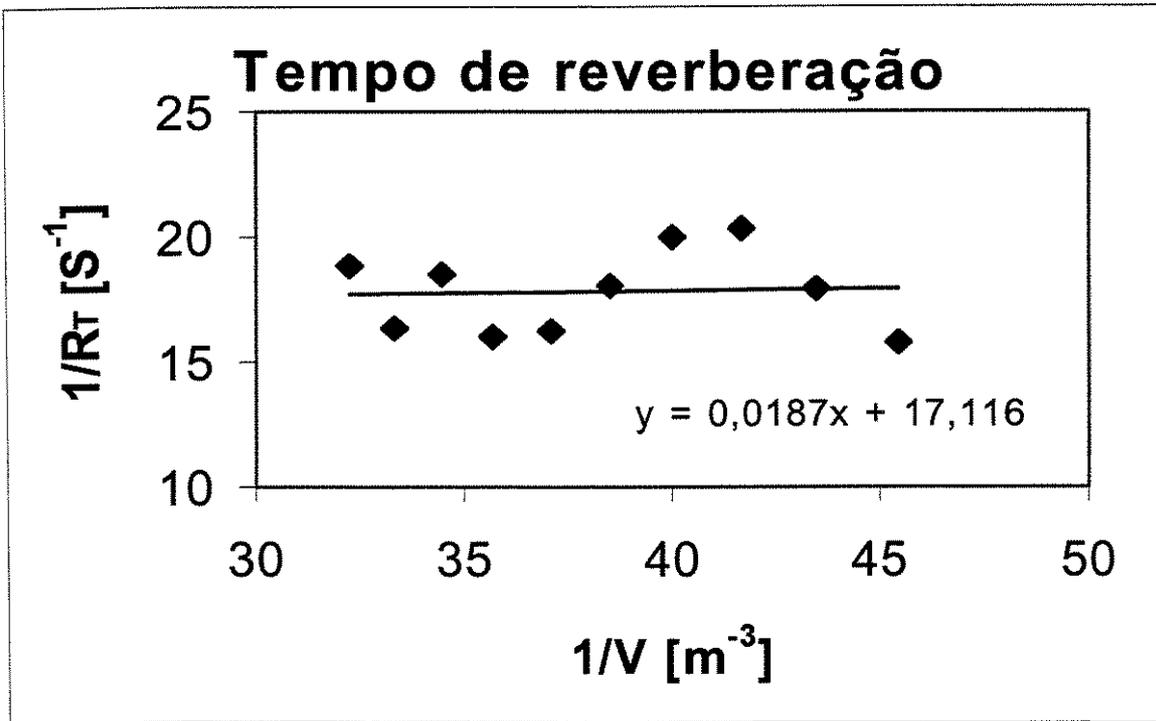


Figura 26 : Frequência de 10 kHz

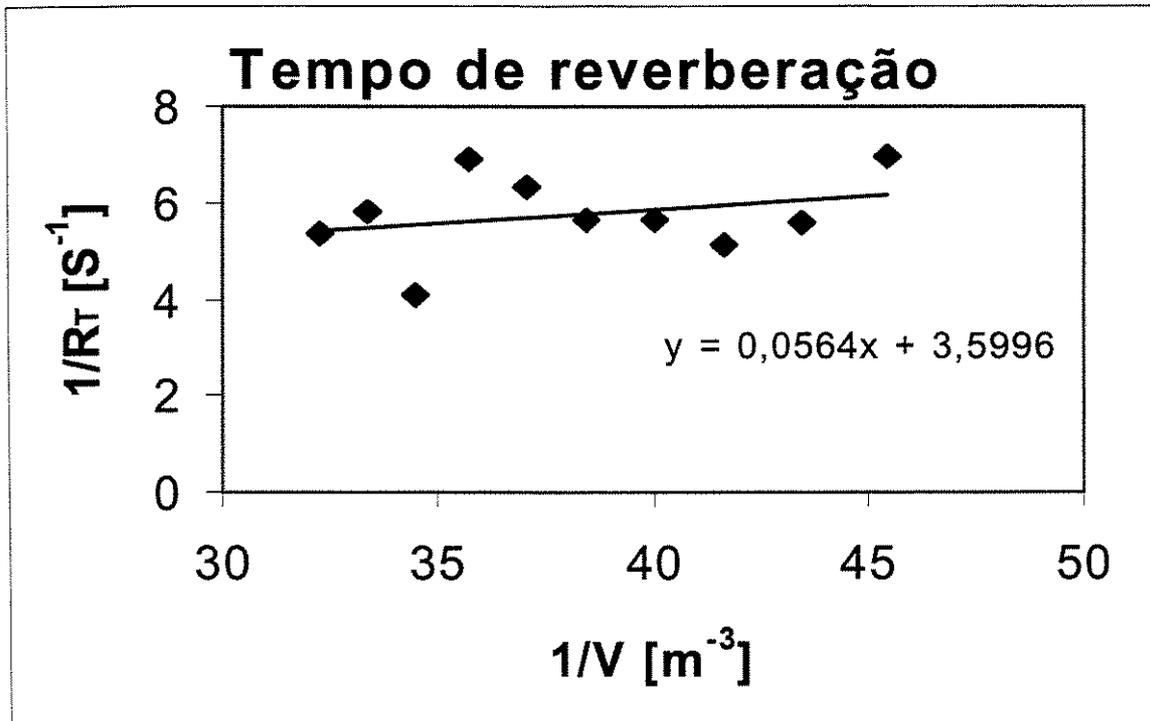


Figura 27 : Frequência de 5 kHz - buzzer

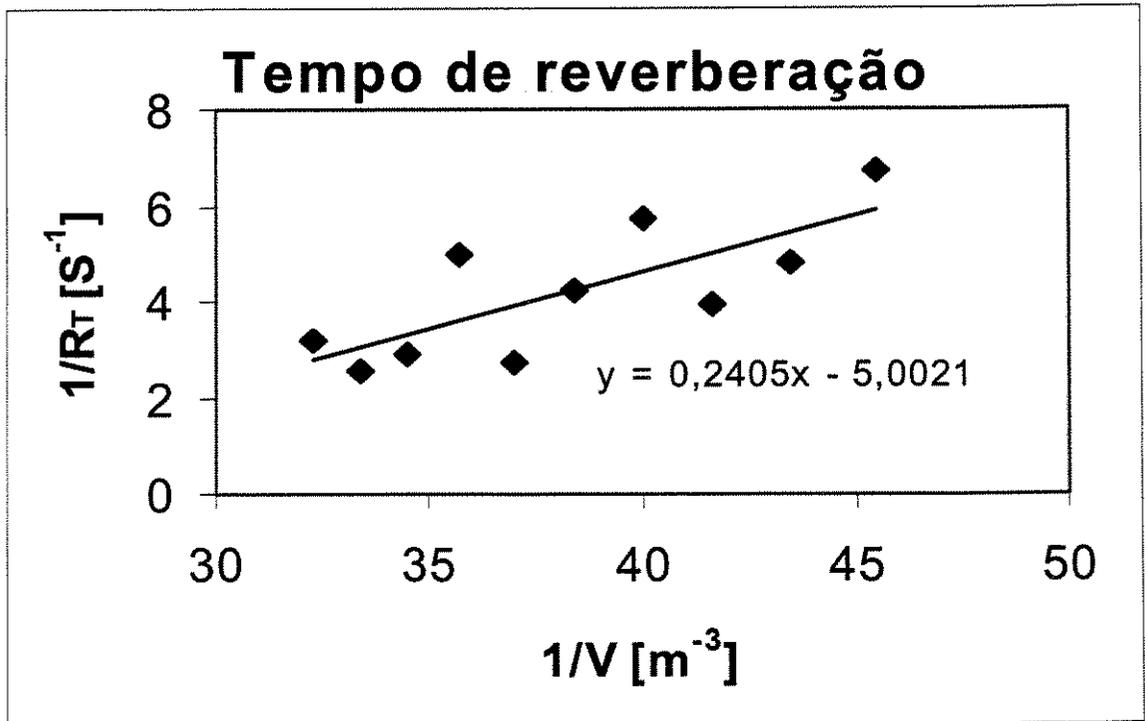


Figura 28 : Frequência de 10 kHz - *buzzer*

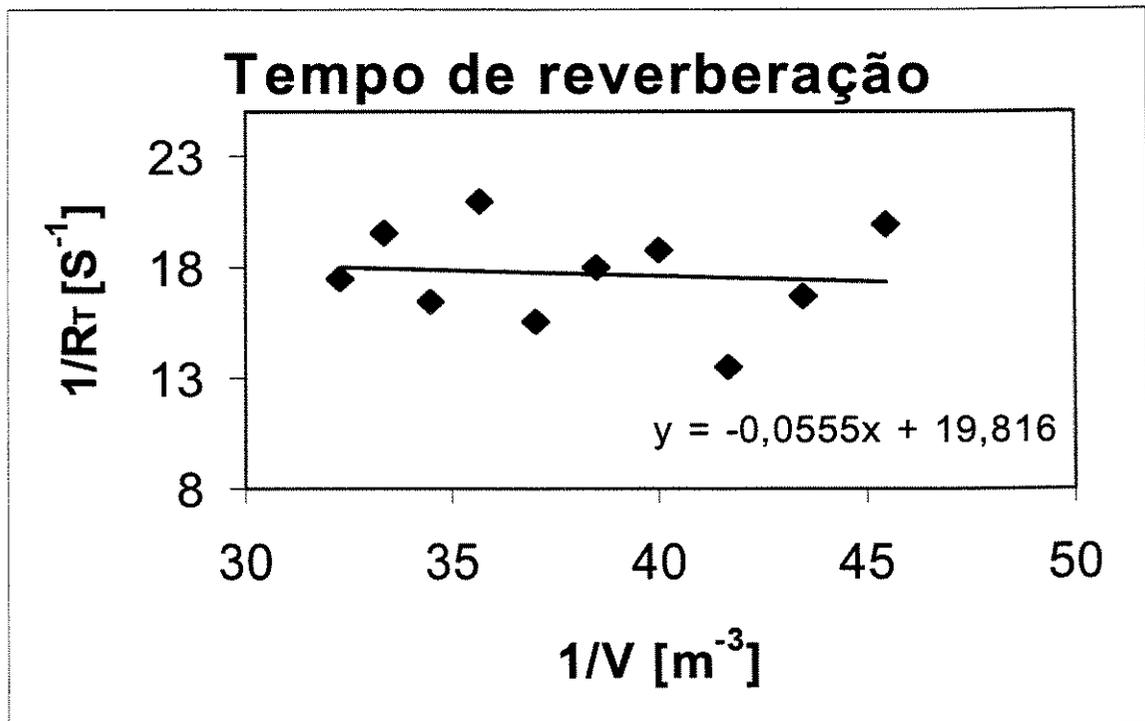


Figura 29 : Frequência de 20 kHz - *buzzer*

Menor variação de volume

As medidas feitas no sistema experimental correspondem a variações mínimas de um litro no volume de líquido. No entanto uma investigação com menor variação de volume foi feita no intuito de qualificar a sensibilidade do sistema à pequenas variações de volume. As medidas efetuadas com a variação de 0,5 litro são apresentadas na tabela 5, bem como nas figuras 30 a 32. Como se pode ver por estes resultados o sistema responde perfeitamente bem a esta menor variação de volume.

Nos valores apresentados na tabela 5 são considerados dois casos: com e sem a tela difusora interna. As medidas foram feitas para uma variação de 5 a 15 l, através do método descrito. A figura 32 é um gráfico dos valores do tempo de reverberação para cada um dos volumes medidos, no caso sem tela difusora.

Const. A	Const. B	Coef. Correl.	Parâmetro D	
0,0861	5,9260	0,97	0,20	Sem tela
0,0661	4,9345	0,96	0,52	
0,1120	9,2318	0,95	0,29	Com tela
0,0580	10,8869	0,93	0,67	

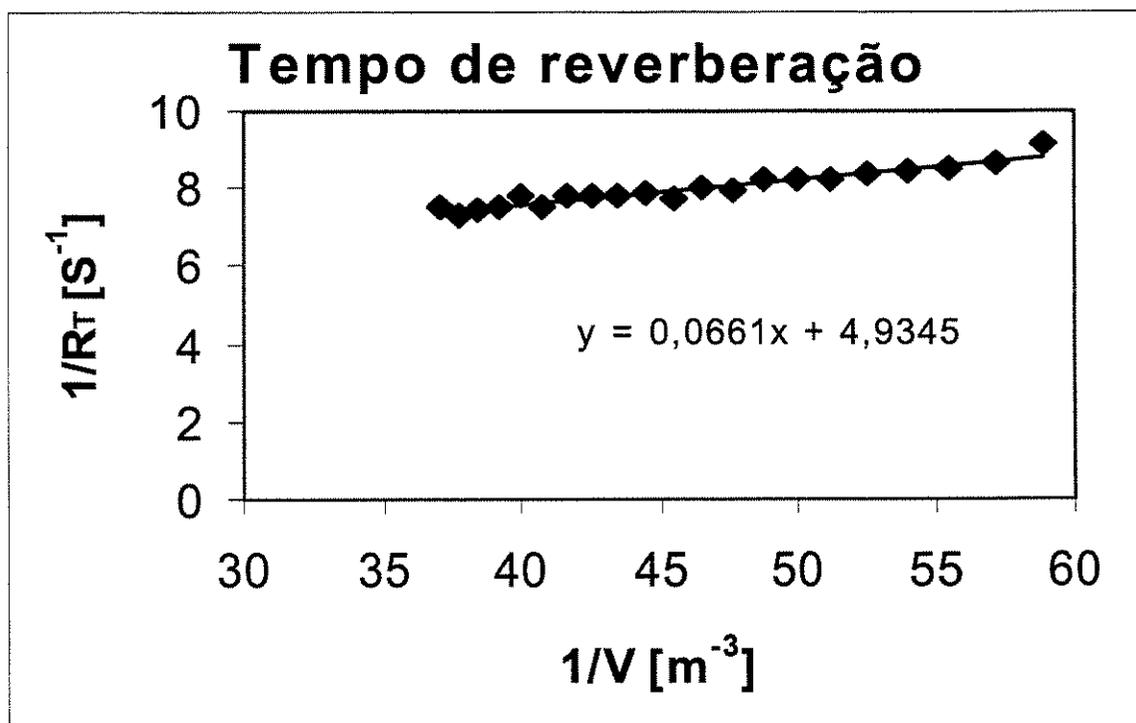


Figura 30 : Variação de 0,5 l – sem tela difusora

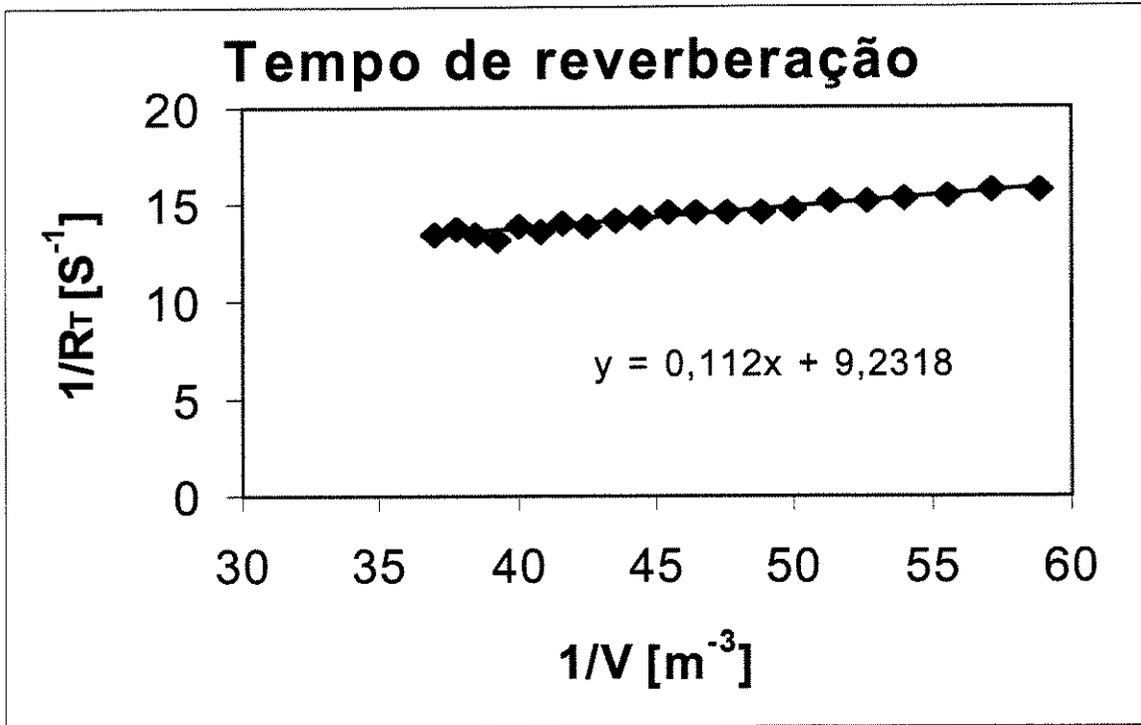


Figura 31 : Variação de 0,5 l – com tela difusora

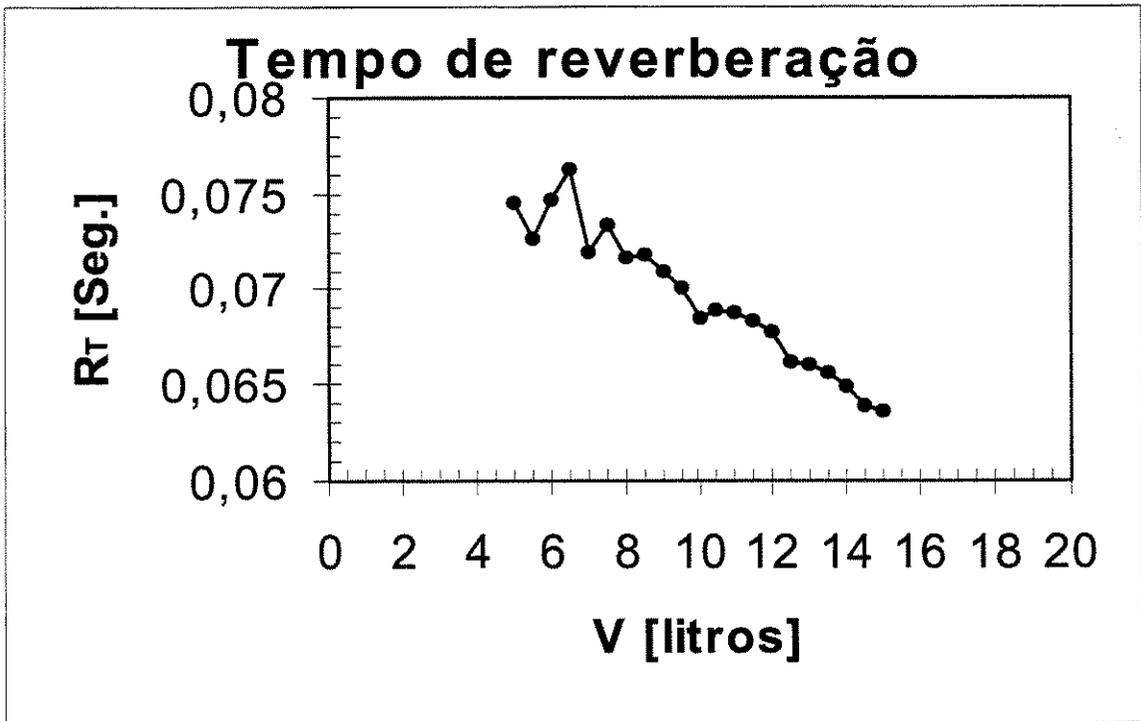


Figura 32 : Tempo de reverberação
Variação de 0,5 l – sem tela

Medições diversas

Ainda investigando o comportamento do sistema com a alteração de alguns parâmetros não diretamente considerados na equação II.17, outras modificações foram introduzidas no decorrer das medidas. Por exemplo, a aplicação de diferentes filtros na entrada do amplificador, aquisição da forma de onda em instantes diferentes, modificações na fórmula de cálculo, aplicação de um revestimento interno no recipiente para aumentar a difusão, medidas feitas com uma quantidade maior de água no tanque, modificação no número de ciclos e frequência de repetição do *burst*.

Nem sempre estas alterações levaram a uma conclusão efetiva sobre a influência do fator observado já que às vezes a provável alteração na medida estava dentro da faixa de variação das medidas e em outras não foi possível isolar completamente o parâmetro modificado.

Os resultados obtidos com a execução do cálculo direto do valor em dB a partir do decaimento da amplitude, sem portanto efetuar os cálculos do valor em RMS, são apresentados na tabela 6 para duas seqüências de medidas. Os gráficos correspondentes são mostrados nas figuras 33 a 36. Pode-se observar que os valores obtidos com o cálculo direto diferem muito dos obtidos pelo método padrão (RMS) apresentando resultados piores, ou seja, alto D e baixo coeficiente de correlação.

Seqüência	Constante A	Constante B	Coef. Correl.	Parâmetro D
Com RMS	0,1190	12,7307	0,95	0,5
Sem RMS	0,0347	7,5562	0,63	0,8
Com RMS	0,1029	7,0966	0,87	0,6
Sem RMS	0,0330	15,6590	0,40	1,0

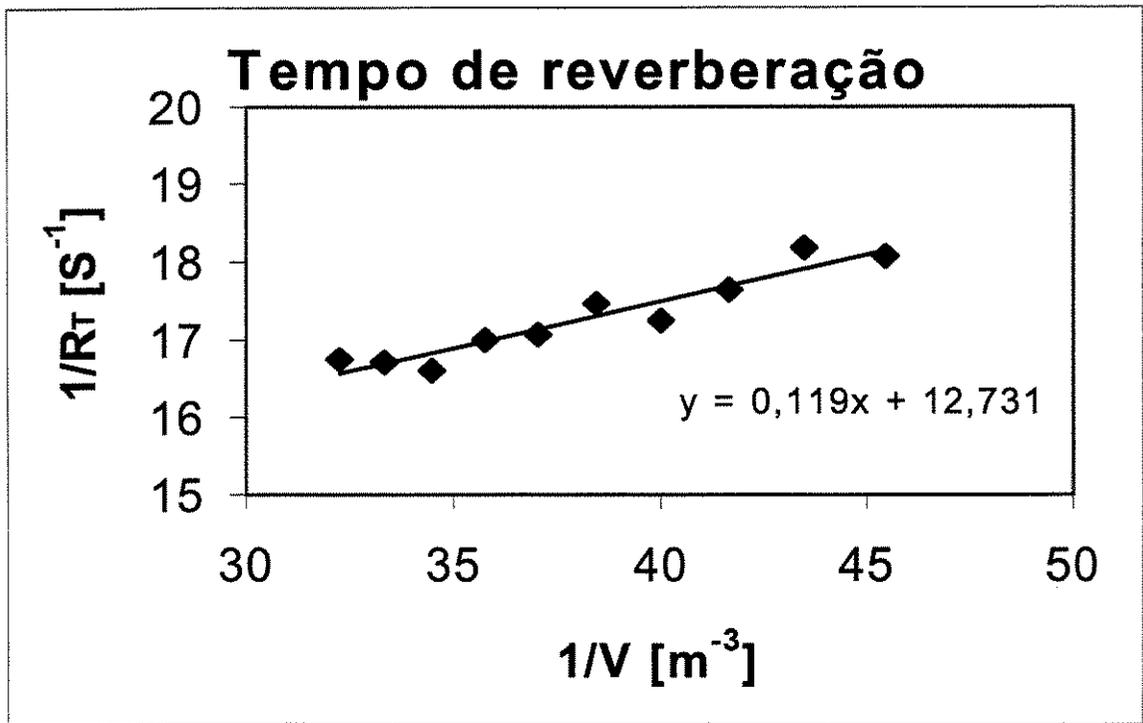


Figura 33: Seqüência com o cálculo em RMS

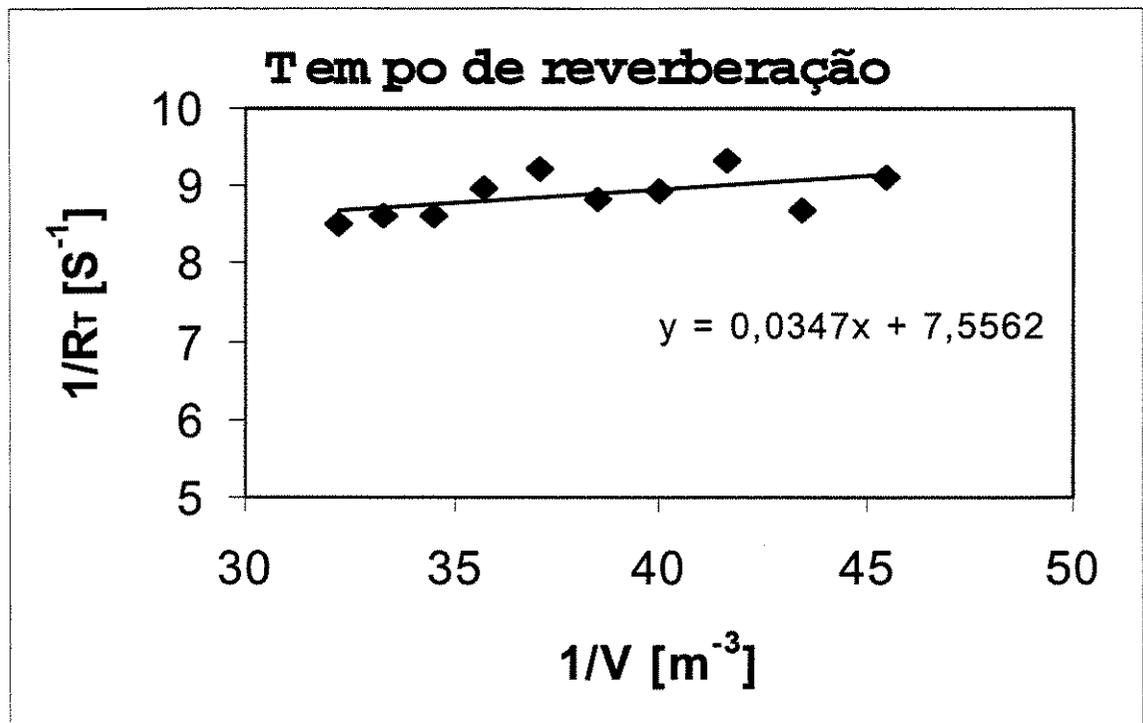


Figura 34 : Seqüência sem o cálculo RMS

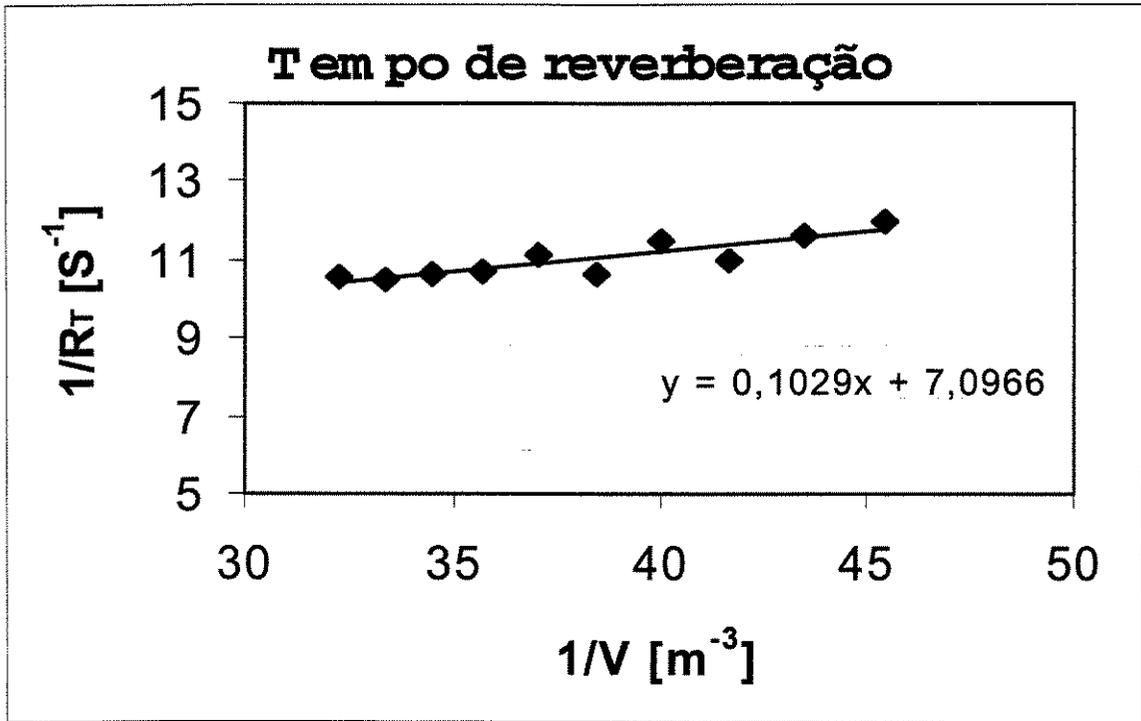


Figura 35 : Sequência com o cálculo RMS

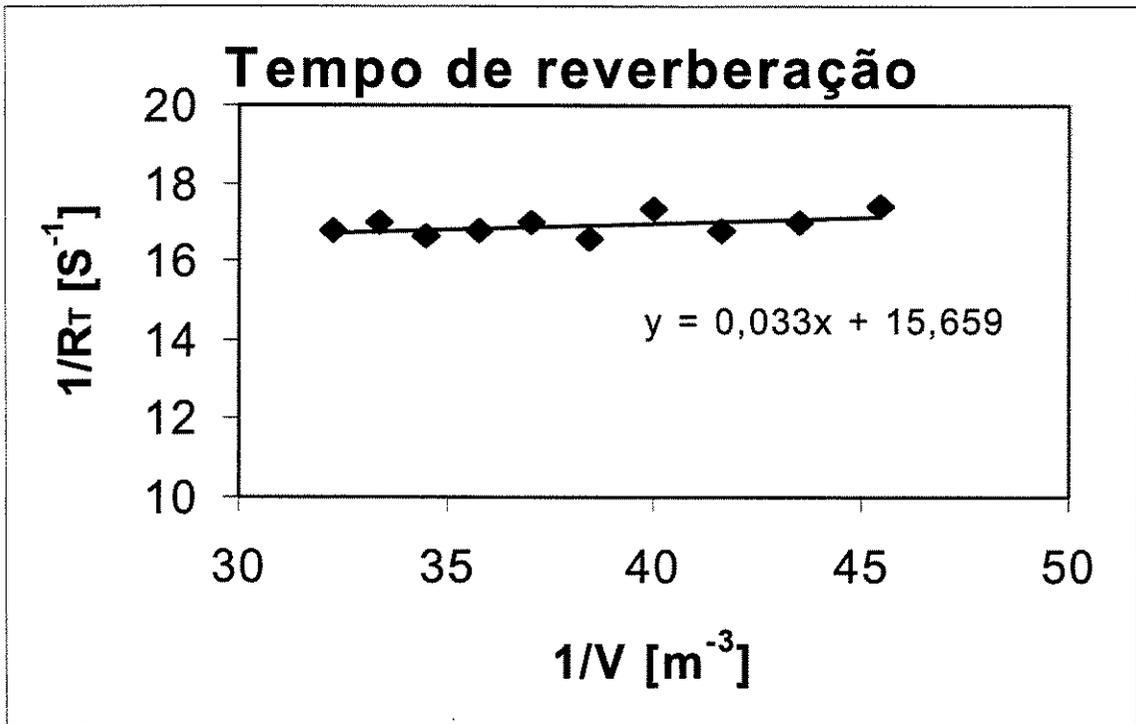


Figura 36 : Sequência sem o cálculo RMS

Reprodutibilidade

A medida repetitiva do tempo de reverberação para um mesmo volume revela uma certa variação de valores. Esta observação encontra correspondência com a natureza randômica do fenômeno da reverberação²³. Afim de qualificar estas variações, foram realizadas medidas em diversos volumes variando entre 1 e 20 litros, em intervalos de 1 litro, sendo que para cada litro o valor do tempo de reverberação foi medido 10 (dez) vezes sendo então calculada uma média destas medidas.

Os valores obtidos para cada um dos níveis são apresentados na tabela 7, onde se mostra o valor médio para cada nível e o desvio médio associado. Estes valores médios do tempo de reverberação correspondentes a cada um dos níveis, mostrados no gráfico da figura 37, são utilizados para compor a reta de regressão de onde são extraídos os valores das constantes A e B . Os desvios de valores para cada volume de líquido também são apresentados na figura 38, onde pode ser observada uma tendência de queda à medida que o volume de líquido aumenta. Todos os desvios estiveram abaixo de 1%.

Com os valores encontrados para as constantes A e B , o volume correspondente em cada nível pode ser calculado. Os resultados são mostrados na figura 39, e na figura 40 é mostrado o desvio em litros associado a cada nível.

Cumprе ressaltar que cada vez que a medida do tempo de reverberação é feita para um dado volume, o que consiste na aquisição da forma de onda, este valor já corresponde a uma média das respostas de um número de pulsos emitidos. Ou seja, a forma de onda adquirida é a forma de onda média do decaimento de cada um dos pulsos individuais. A resposta obtida para um único pulso pode variar bastante, principalmente no caso em que a medida é tomada em um ambiente perturbado, como é o caso de um tanque com água em agitação.

Tabela 7a : Conjunto de medições para vários níveis

Medida	1litro	2 litros	3 litros	4 litros	5 litros
1	0,15139	0,15043	0,14846	0,14728	0,14354
2	0,15020	0,14841	0,14986	0,14699	0,14412
3	0,15030	0,14886	0,14783	0,14975	0,14466
4	0,14829	0,14868	0,14901	0,14702	0,14336
5	0,15073	0,14766	0,14942	0,14777	0,14500
6	0,15262	0,14724	0,14763	0,14903	0,14410
7	0,15128	0,14955	0,14828	0,14781	0,14343
8	0,15044	0,15046	0,14939	0,14965	0,14507
9	0,14993	0,14817	0,14928	0,14831	0,14301
10	0,15266	0,15007	0,14825	0,14936	0,14567
Média:	0,1508	0,1490	0,1487	0,1483	0,1442
Desv. Médio:	0,64	0,63	0,44	0,62	0,50
Medida	6 litros	7 litros	8 litros	9 litros	10 litros
1	0,13869	0,13669	0,13526	0,13333	0,12603
2	0,13974	0,13967	0,13490	0,13366	0,12659
3	0,14116	0,13882	0,13412	0,13276	0,12765
4	0,14039	0,13849	0,13396	0,13394	0,12840
5	0,13847	0,13819	0,13599	0,13317	0,12798
6	0,14082	0,13784	0,13663	0,13269	0,12786
7	0,14047	0,13648	0,13538	0,13255	0,12697
8	0,14117	0,13796	0,13633	0,13322	0,12743
9	0,13998	0,13785	0,13650	0,13173	0,12760
10	0,13986	0,13662	0,13645	0,13286	0,12781
Média:	0,1401	0,1379	0,1356	0,1330	0,1274
Desv. Médio:	0,52	0,56	0,61	0,36	0,43

Tabela 7b : Conjunto de medições para vários níveis

Medida	11 litros	12 litros	13 litros	14 litros	15 litros
1	0,12439	0,12393	0,12036	0,11525	0,11446
2	0,12466	0,12454	0,11885	0,11746	0,11446
3	0,12531	0,12337	0,11977	0,11624	0,11343
4	0,12584	0,12313	0,12036	0,11692	0,11449
5	0,12472	0,12436	0,11784	0,11646	0,11428
6	0,12496	0,12391	0,11903	0,11571	0,11507
7	0,12552	0,12412	0,11958	0,11606	0,11506
8	0,12490	0,12414	0,11983	0,11440	0,11444
9	0,12588	0,12377	0,11904	0,11559	0,11490
10	0,12524	0,12246	0,12014	0,11683	0,11425
Média:	0,12514	0,12377	0,11948	0,11609	0,11448
Desv. Médio:	0,33	0,38	0,53	0,59	0,28
Medida	16 litros	17 litros	18 litros	19 litros	20 litros
1	0,11022	0,10752	0,10360	0,09801	0,09385
2	0,11094	0,10749	0,10323	0,09895	0,09481
3	0,11062	0,10753	0,10232	0,09947	0,09501
4	0,11078	0,10790	0,10279	0,09876	0,09540
5	0,11174	0,10765	0,10266	0,09908	0,09528
6	0,10927	0,10741	0,10261	0,09838	0,09485
7	0,11068	0,10762	0,10268	0,09905	0,09503
8	0,11083	0,10676	0,10303	0,09901	0,09504
9	0,11106	0,10732	0,10283	0,09916	0,09506
10	0,11103	0,10759	0,10296	0,09873	0,09483
Média:	0,11072	0,10748	0,10287	0,09886	0,09492
Desv. Médio:	0,37	0,18	0,26	0,32	0,28

Constante A = 0,07897

Coeficiente de correlação = 0,996

Constante B = 4,09435

Parâmetro D = 0,35

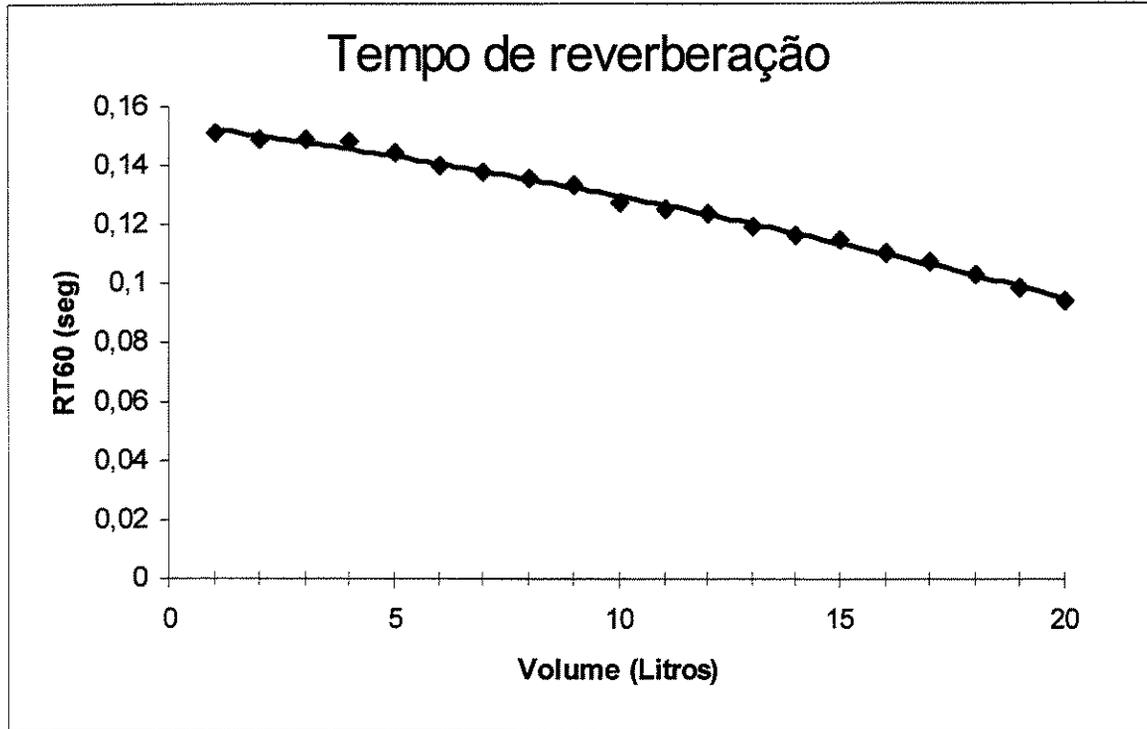


Figura 37 : Variação do tempo de reverberação valores médios

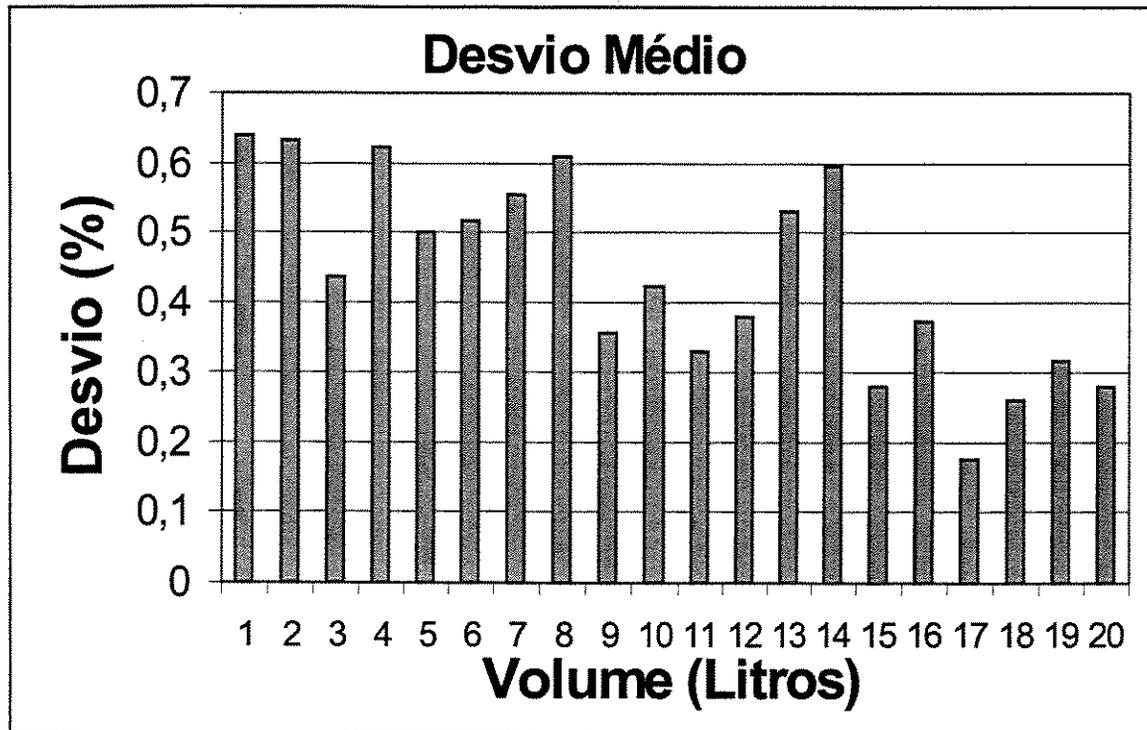


Figura 38 : Desvio médio em cada nível

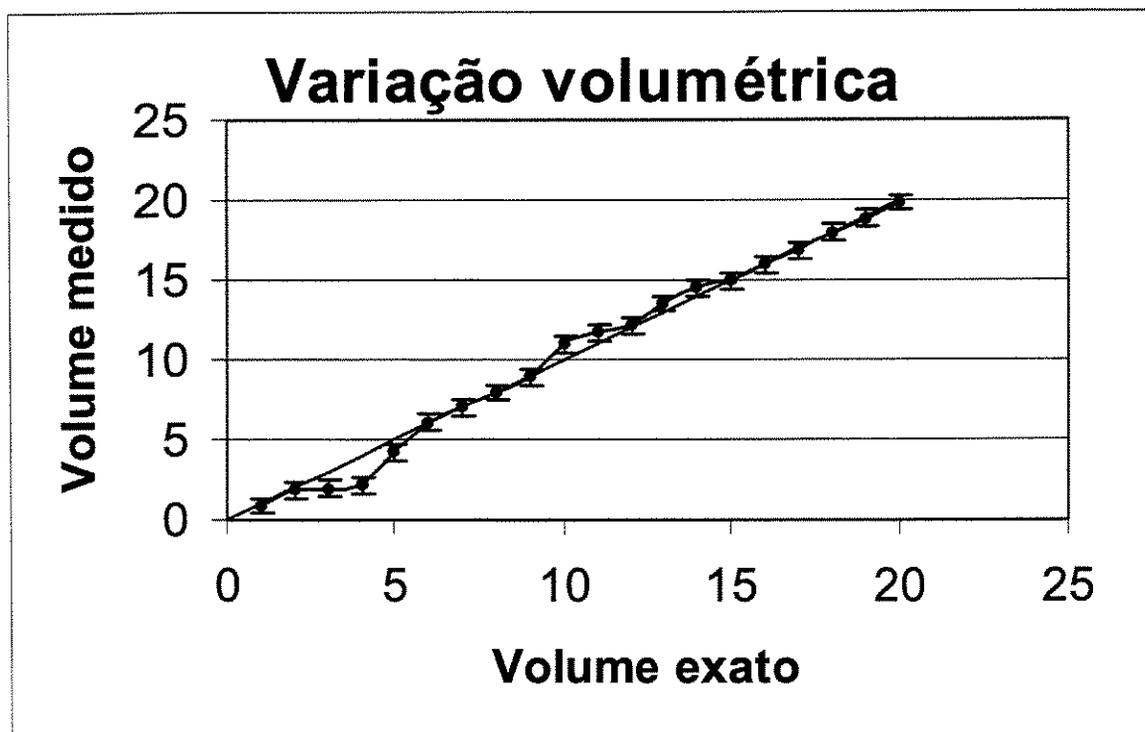


Figura 39 : Variação volumétrica medida valores médios

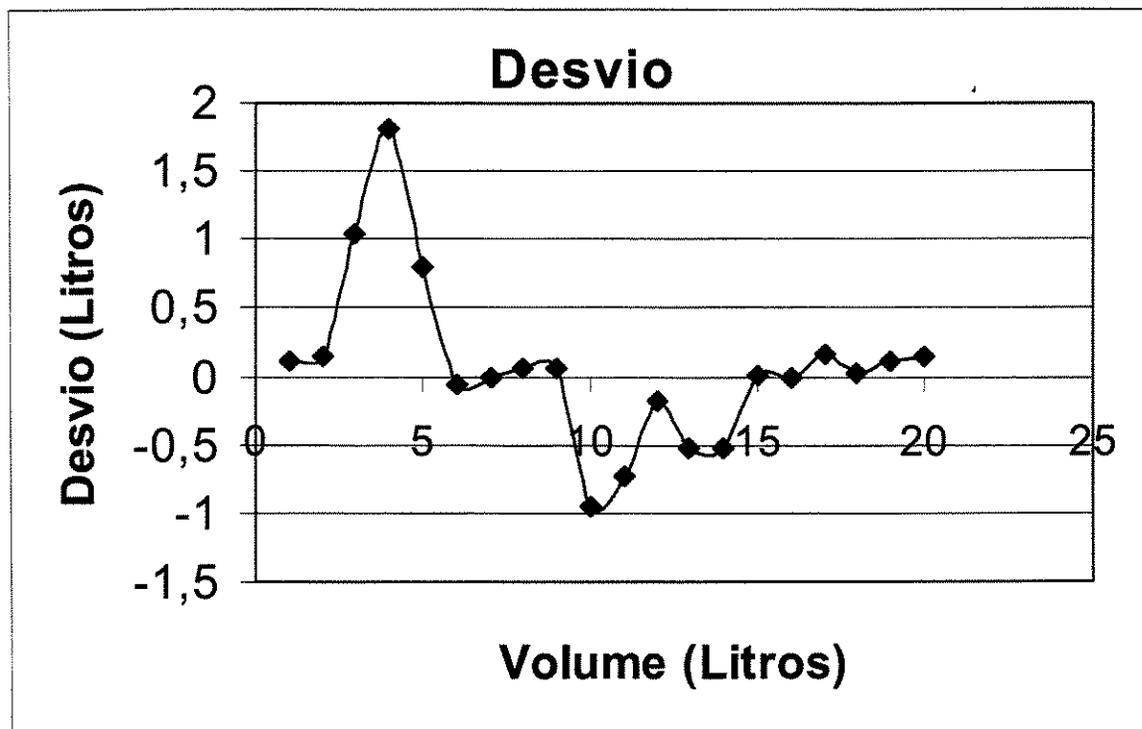


Figura 40 : Desvios em cada medida valores médios

Variabilidade

Uma outra consideração importante diz respeito à variação das medidas ao longo do tempo. Para avaliá-la, várias medições feitas absolutamente sob as mesmas condições, são comparadas. Com isto, é encontrado um valor médio para cada uma das constantes A e B , que devem se constituir em valores característicos do sistema e por isto permanecer inalterados desde que sejam mantidas as mesmas condições de operação.

Os valores médios para A e B são empregados para se calcular o volume corresponde às medidas de cada uma das seqüências, e assim obter uma imagem da dispersão dos valores em cada nível. Estes dados são apresentados nas tabelas seguintes. Na tabela 8 são apresentados os valores encontrados para as constantes A e B , juntamente com o cálculo de seus valores médios. A tabela 9 mostra os valores de volume calculados a partir dos valores médios das constantes, e o parâmetro de dispersão das medidas D calculado para cada um dos níveis considerados. O gráfico da figura 41 mostra a variação do parâmetro D com a mudança de volume, onde podemos observar que este parâmetro diminui à medida que o volume aumenta.

	Constante A	Constante B	Coef. Correl.	Parâmetro D
	0,0737	4,5280	0,9953	0,35
	0,0737	4,5500	0,9978	0,20
	0,0742	4,5010	0,9967	0,15
	0,0744	4,4391	0,9986	0,10
	0,0694	4,7518	0,9948	0,25
	0,0752	4,7731	0,9861	0,40
	0,0736	4,5354	0,9892	0,45
	0,0747	4,4678	0,9939	0,20
	0,0790	4,0944	0,9958	0,35
	0,0779	4,1499	0,9945	0,30
Média :	0,0746	4,4790	0,9943	0,28
Desvio padrão %:	3,45	4,88	0,39	41,33

Tabela 9 : Valores de volume

litros	Valores medidos										D
1	-1,51	1,36	-0,29	0,62	2,53	1,94	-0,15	-1,77	-2,64	-2,04	0,80
2	-0,99	2,70	2,26	1,48	2,96	3,77	0,11	0,74	-1,38	-0,85	0,90
3	-1,25	3,02	2,22	1,70	2,17	6,12	0,26	3,42	-1,24	-1,60	0,80
4	2,37	3,82	3,99	4,15	4,47	6,02	4,67	2,98	-0,94	-0,95	0,60
5	3,94	5,88	5,80	4,75	5,67	9,24	5,67	5,27	1,63	2,33	0,80
6	4,30	7,34	6,41	5,61	7,27	7,67	6,72	6,46	3,96	4,01	0,70
7	6,51	6,66	7,45	6,16	7,22	9,51	7,82	7,18	5,12	5,13	0,50
8	7,95	8,70	7,65	7,44	9,00	10,40	7,90	8,21	6,27	5,80	0,60
9	8,82	9,17	9,50	8,30	9,48	12,04	9,45	9,24	7,47	8,03	0,40
10	9,85	10,07	10,23	10,16	10,84	12,21	9,61	10,22	9,86	9,79	0,20
11	10,64	11,11	11,19	10,99	10,78	13,78	11,53	10,97	10,76	10,48	0,30
12	10,88	12,36	11,71	11,92	12,22	14,14	12,74	11,90	11,29	11,29	0,50
13	12,78	13,08	13,45	12,73	13,29	14,72	13,68	13,28	12,83	12,98	0,20
14	13,74	14,09	14,01	13,90	14,57	15,47	14,82	14,38	13,96	14,13	0,30
15	14,41	14,94	15,07	14,98	14,77	16,16	14,93	15,24	14,48	14,34	0,40
16	15,50	16,02	15,88	15,52	15,40	16,71	16,03	15,99	15,62	15,52	0,20
17	17,11	16,99	16,81	16,73	17,05	17,86	16,94	16,94	16,54	16,59	0,10
18	17,86	18,13	17,59	17,70	17,60	18,93	17,83	18,21	17,77	17,78	0,10
19	19,01	18,68	18,94	18,94	18,46	19,36	18,84	18,96	18,77	18,70	0,10
20	20,26	20,22	20,19	20,01	19,77	20,66	19,66	19,66	19,80	19,65	0,10

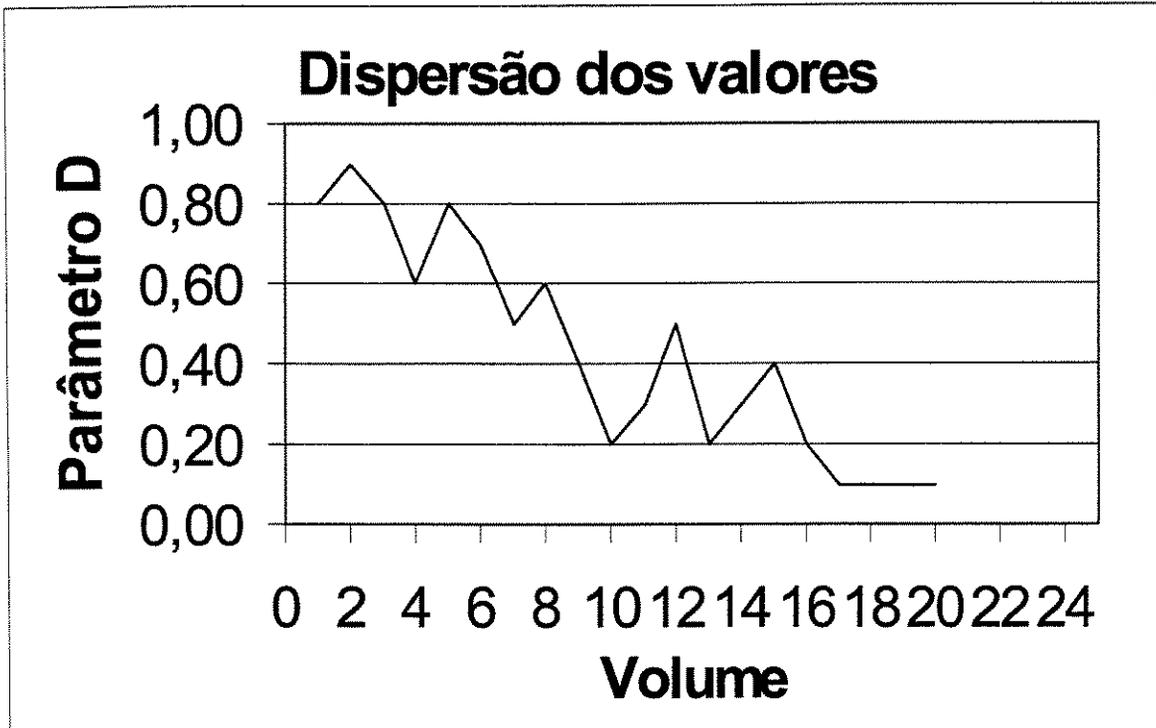


Figura 41 : Dispersão dos valores de volume em cada nível

VII - Análise dos dados

A primeira observação importante no comportamento do sistema é que o fato da medida ser efetuada com a superfície em agitação produz uma melhora significativa nos resultados. Na verdade a agitação faz com o coeficiente de correlação fique bem próximo de um, indicando uma boa concordância com a teoria da reverberação.

Esta melhora dos resultados com a agitação pode ser explicada se considerarmos que o campo sonoro dentro do recipiente não é perfeitamente difuso. Isto pode ser comprovado ao observarmos a figura 10 onde podem ser vistos picos de amplitude isolados na imagem do sinal recebido, e também se notarmos os resultados obtidos com a mudança de posicionamento do transdutor nas figuras 22 e 23. Com isto, fica claro que o campo sonoro não apresenta um decaimento exponencial perfeito ao longo do tempo e também não é homogêneo e nem isotrópico, contrariando assim as premissas para um campo difuso¹⁷.

Desta forma, a agitação contribui para que o campo no interior do recipiente seja mais próximo de um campo difuso, à medida que randomiza as reflexões sonoras e desta maneira faz com que os raios sonoros que atingem o receptor venham de todas as direções e regiões do recipiente. Além disso, as medidas que são feitas com o sistema em agitação são tomadas a partir de uma forma de onda média, contribuindo para a eliminação dos picos isolados e que são devidos aos ecos vindos das paredes do recipiente e da superfície do líquido.

Os principais motivos que fazem com que o campo sonoro dentro do recipiente não seja perfeitamente difuso é a sua forma e a superfície metálica das paredes, que contribui para a reflexão especular. Como já mencionado anteriormente, somente em um ambiente de forma perfeitamente cúbica é possível se gerar um campo perfeitamente difuso¹³. Em nosso caso as experiências foram realizadas em um recipiente cilíndrico o que produz uma convergência dos feixes sonoros contribuindo para a não homogeneidade do campo.

Um outro fator que faz com que o campo sonoro tenha baixa difusidade é a distribuição não uniforme dos coeficientes de absorção dentro do ambiente²⁴. Esta é a situação que ocorre no sistema uma vez que o coeficiente de absorção da superfície do líquido é muito maior (em torno de uma ordem de grandeza²⁵) do coeficiente de absorção da superfície metálica.

O fato das paredes do recipiente serem compostas de uma superfície lisa e metálica contribui para a geração de um campo sonoro não difuso. Quando as ondas sonoras incidem sobre uma superfície com estas características, parte do som é refletido de forma difusa (como desejado) e parte é refletida de forma especular^{13,26} seguindo a Lei de Snell. Esta reflexão especular, que se constitui nos ecos, é um dos principais responsáveis pelas discrepâncias nas medidas.

Nenhuma das medidas adotadas para se conseguir um campo mais difuso através da modificação das características das superfícies tiveram resultados satisfatórios. A colocação da tela de aço inoxidável com furos de dimensões aproximadas de um comprimento de onda e que deveria produzir difusão dos feixes sonoros através da difração não produziu os efeitos desejados, causando inclusive maior discrepância dos valores (maior fator D) e menor concordância (menor coeficiente de correlação), como pode ser observado na tabela 3 (pág. 36). Isto provavelmente se deve ao aumento da reflexão especular devido a superfície plana da tela.

Outra tentativa de alteração da superfície com a colocação de anteparos de forma a torna-la rugosa, não produziu resultados nem ao menos mensuráveis, apresentando inclusive, coeficientes de correlação negativos. Isto demonstra a dificuldade de se encontrar um ponto ideal onde estas modificações possam ser aplicadas com êxito. No entanto, não foi dado prosseguimento a esta investigação uma vez que outras medidas adotadas proporcionaram resultados bastantes satisfatórios, e a modificação da superfície não é uma solução desejada tendo em vista a aplicação a que se destina primordialmente o sistema.

Os transdutores também exercem forte influência sobre os resultados das medidas (tabela 2 – pág. 29). A resposta polar dos transdutores é a principal característica que interfere no valor medido do tempo de reverberação²². As adaptações feitas nos transdutores empregados, no caso os transdutores piezoelétricos de 40 kHz, que resultaram numa melhora dos resultados são justamente as que atuaram modificando esta característica de resposta.

A remoção da cobertura externa no transmissor fez com que as ondas sonoras emitidas perdessem sua característica direcional, expondo a cerâmica e permitindo que as vibrações laterais fossem irradiadas. No receptor, a remoção da cobertura externa possibilitou o recebimento de ondas sonoras vindas de todas as direções, permitindo a geração e a recepção de um campo sonoro mais difuso. No entanto, expõe também o receptor à influência direta dos ecos de reflexão que são um dos grandes causadores de discrepância nas medidas.

A solução adotada para se eliminar a captação destes pulsos de eco e possibilitar que apenas o sinal devido à parcela difusa do som seja captado, foi a colocação de um pequeno tubo na frente dos transdutores. As dimensões do tubo são tais que as ondas sonoras ao passarem pela abertura do mesmo sofrem difração¹⁰ espalhando-se em todas as direções. No transmissor isto é aproveitado para se ter uma emissão de ondas divergentes, e no receptor para permitir que apenas a parcela difusa do som consiga atingir o transdutor. Na realidade, porém, uma parcela dos feixes relacionados às reflexões diretas (ecos) que possuem uma direção favorável acabam atingindo o receptor.

O simples uso de transdutores pouco direcionais não foi suficiente para se garantir um bom resultado da medida, uma vez que isto expõe o receptor à captação dos ecos diretos. Desta forma, um transdutor ideal para o sistema deve ser aquele que no transmissor produza uma emissão divergente e homogênea e no receptor privilegie a captação do som de natureza difusa, bloqueando a captação dos ecos de reflexão. O resultado esperado no receptor pode ser conseguido aumentando sua direcionalidade, uma vez que isto não impede a captação do som de natureza difusa (sem direção específica), mas restringe muito a captação dos ecos diretos. Estas observações são comprovadas pelos resultados apresentados na tabela 2 uma vez que os resultados obtidos com o uso do *buzzer* como transmissor (baixa direcionalidade) e do transdutor piezoelétrico como receptor (maior direcionalidade) foram satisfatórios. Os melhores resultados foram obtidos com a colocação de um tubo frontal nos transdutores, o que no transmissor diverge o feixe sonoro produzindo o efeito de direcionalidade zero, e no receptor produz um aumento de direcionalidade.

Como as características acústicas dos transdutores interferem no valor medido, os transdutores devem manter inalteradas suas características ao longo do tempo. Esta observação é de suma importância para um sistema de medida de combustível onde os sensores ficarão sujeitos aos vapores e respingos do líquido combustível que na maioria das vezes se constitui de um produto solvente.

Os resultados obtidos com o uso do sistema em frequências diferentes não foram conclusivos, uma vez que os transdutores utilizados não tinham as características adequadas para se efetuar as medidas com razoável precisão e reprodutividade. Desta forma, trabalhos posteriores devem ser desenvolvidos com transdutores adequados que possam atuar em diversas frequências. O propósito deste trabalho não era o de se determinar qual a frequência ideal de operação do sistema e sim aprimorá-lo para operar na frequência escolhida de 40 kHz.

A única observação válida para a consideração da frequência é que esta deve ser tal que garanta o uso da teoria de *ray tracing*; ou seja, o comprimento de onda deve ser menor que a menor dimensão presente no ambiente. Este princípio é enunciado por Schroeder e Kuttruff através do limite de Schroeder¹⁸ que estabelece a condição a ser satisfeita pela frequência para que o campo sonoro tenha características de um campo difuso:

$$f_s \approx 2000 \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}}$$

Onde V é o volume do ambiente.

A aplicação desta fórmula na determinação da frequência ideal para a operação do sistema requer o conhecimento prévio do tempo de reverberação. Como este varia com a frequência, a utilização desta condição só faz sentido quando o tempo de reverberação pode ser calculado teoricamente, através do conhecimento dos coeficientes de absorção das superfícies. Este não é o caso das medidas que temos efetuado, onde também temos uma variação constante de volume e portanto diferentes situações para cada nível.

O modelo assumido para o fenômeno da reverberação sonora pressupõe a existência de diversos caminhos sonoros percorridos pelos vários feixes de energia sonora¹⁶ que, como já foi mencionado, sofrem reflexões nas paredes e na superfície da água. A cada incidência o feixe pode fazê-lo com um ângulo diferente e a proporção de energia irradiada especularmente varia de uma forma não perfeitamente modelada, apresentando características aparentemente aleatórias²⁷. Desta forma, pode-se esperar que uma medida associada a este fenômeno apresente certa flutuação dos valores, fruto da natureza randômica do fenômeno. Estas variações têm sido investigadas por vários autores, de maneira que o valor do tempo de reverberação de um ambiente não é assumido como sendo um número exato, mas admite-se certa variação dos resultados¹⁷.

As flutuações que ocorrem em medidas consecutivas demonstraram não ser maiores do que 1%, como pode ser visto na tabela 7 (pág.47 e 48). Desta forma, o valor médio assumido como o tempo de reverberação para um dado volume expressa convenientemente a informação de interesse, ou qualquer dos valores apresentados pode ser assumido como sendo o tempo de reverberação sem a introdução de grandes erros na medida.

Uma característica importante dos desvios das medidas é observada no gráfico da figura 38 (pág. 49) onde se observa uma diminuição do desvio com o aumento do volume de líquido. Esta característica volta a aparecer quando se faz a análise da variação das medidas ao longo do tempo, onde os menores volumes de líquido implicam numa maior discrepância das medidas.

A interpretação para este comportamento do sistema, ou seja o aumento da imprecisão com pouco líquido, leva em conta as alterações sofridas pelo sistema durante a variação de volume, e que correspondem a um aumento da superfície lateral e a uma diminuição da espessura do líquido. A superfície lateral por ser metálica e plana é a principal responsável pelas reflexões não difusas dos feixes sonoros²⁸ (reflexões especulares), e são estas reflexões especulares que causam os ecos diretos que por sua vez descaracterizam o campo difuso e divergem os resultados. Portanto, quanto maior for a superfície lateral do recipiente (menor volume de líquido) maior será a reflexão especular, menos difuso o campo sonoro e maior a discrepância das medidas.

A superfície da água, por se encontrar em agitação, é a responsável pela randomização dos feixes sonoros, contribuindo para a difusidade do campo. No entanto, nas situações de pouca quantidade de líquido o coeficiente de absorção do líquido pode variar devido a mudanças na espessura do líquido e a eventuais exposições do fundo do recipiente. Estas variações do coeficiente de absorção se refletem numa variação dos valores do tempo de reverberação e, assim, também são responsáveis pelas variações dos valores medidos.

Estes mesmos fatores também são responsáveis pela variação de valores que se observam em várias medidas efetuadas ao longo do tempo. Neste caso, as constantes A e B são determinadas para cada uma das seqüências efetuadas, e desta forma a variação das constantes pode ser conhecida, o que tem relação direta com a precisão dos valores medidos. Os valores de A e B apresentaram uma variação de menos de 5% (tabela 8 - pág. 51), o que garante boa reprodutividade dos valores, uma vez que os valores médios destas constantes é que são utilizados nos cálculos do volume apresentados na tabela 9 (pág. 52). Neste caso, cada seqüência medida foi realimentada com os valores médios de A e B considerados como sendo as constantes características do sistema. Mais uma vez, pôde ser observado que as medidas efetuadas com pouco volume de líquido apresentaram desvios maiores. As razões para esta característica já foram discutidas anteriormente.

Embora o valor encontrado para um dado volume possa variar de uma medida para outra, esta variação só é significativa para pequenos volumes de líquido, e um sistema de medida automatizado deve efetuar um cálculo da média de forma a contornar esta variação. A medida automática também aponta para a necessidade do uso de um circuito de cálculo de RMS²⁹, uma vez que os cálculos efetuados diretamente do decaimento em amplitude não apresentaram resultados satisfatórios.

VIII – Outros fatores de influência

Nesta seção procederemos a uma análise da influência de alguns fatores que não são diretamente mensuráveis. Entre estes, temos as ondas estacionárias, os coeficientes de absorção e o coeficiente de atenuação sonora no ar. A influência dos fatores climáticos, ou seja, temperatura e umidade relativa se dão como um efeito de segunda ordem sobre o sistema, influenciando os coeficientes de absorção sonora das superfícies e de atenuação do ar, e ainda a própria velocidade do som dentro do recipiente.

Ondas estacionárias

A excitação de um recipiente fechado com uma fonte sonora faz com que surjam ondas estacionárias em seu interior. A frequência destas ondas se encontra relacionada com as dimensões do recipiente. Este é o caso do sistema de medição estudado onde um pulso de energia sonora (*burst*) é aplicado no interior de um tanque de combustível. Desta forma, devemos esperar o aparecimento de modos de oscilação próprios. Além disso, como o volume vazio no interior do tanque varia (volume da cavidade de ar), podemos esperar que a frequência destas ondas estacionárias e conseqüentemente de suas harmônicas mudem à medida que o volume no interior do tanque varia.

A modelagem exata destas ondas requer a resolução de equações diferenciais em três dimensões bastante complexas. Assim, vamos nos limitar a uma análise qualitativa dos fatos. Kuttruff¹³ tem demonstrado em seu livro que somente as ondas estacionárias de frequências próximas à da fonte de excitação poderão contribuir para o decaimento do sinal. Desta forma, os modos de vibração que têm frequência fora desta faixa, mesmo estando presentes, não devem causar influência sobre o tempo de reverberação.

Considerando, também, que quando temos um campo sonoro difuso a densidade de autofrequências presentes é alta, de forma que muitos modos de vibração são excitados tendo relações de fase aproximadamente randômicas entre si, então os efeitos de fase são cancelados quando estes modos são superimpostos¹⁸. Este é outro fator que faz com que a presença de ondas estacionárias não seja um impedimento nas medidas, desde que o campo sonoro seja difuso.

As medidas do tempo de reverberação normalmente são efetuadas em faixas de espectro do som audível, mas o sistema de medição implementado opera sintonizado na frequência de 40kHz. Assim, a presença de um modo de vibração com uma frequência fora desta faixa não poderá ser detectado e portanto não interferirá na medida.

Coefficiente de absorção

O coeficiente de absorção de uma determinada superfície é definido como um valor médio¹³, agregando um certo grau de incerteza na determinação do tempo de reverberação. Uma das características responsáveis por esta dispersão é a dependência que o coeficiente de absorção tem com o ângulo de incidência dos raios sonoros²⁸. Esta dependência é expressa na fórmula de Paris³⁰ :

$$\langle \alpha \rangle = 2 \int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta$$

No entanto se o campo sonoro é difuso, a influência que a dependência angular do coeficiente de absorção causa na medida do tempo de reverberação não é considerável²⁸. Desta forma, vemos que a garantia de um campo sonoro difuso no interior do ambiente também garante que os valores do coeficiente de absorção sejam estáveis, assegurando maior precisão das medidas. O coeficiente de absorção mantém também uma estrita relação com a frequência do sinal sonoro.

Coefficiente de atenuação do ar

A atenuação do som no ar é normalmente desconsiderada para ambientes de pequenas dimensões. No entanto, quando a frequência envolvida é alta, o coeficiente de atenuação pode ter influência considerável sobre o valor das medidas. Os fatores climáticos do ambiente, ou seja, temperatura e umidade exercem uma grande influência sobre o valor do coeficiente de absorção. Mijic e outros³¹, têm demonstrado a influência da temperatura e da umidade na medida do tempo de reverberação em uma câmara. Neste trabalho foi encontrado que a influência da temperatura é consideravelmente maior do que a influência da umidade.

Embora os resultados obtidos por Mijic não possam ser aplicados aqui de forma imediata, uma vez que as condições são completamente diferentes, ele demonstra as características de comportamento de um campo difuso em face às alterações climáticas, e desta forma permite intuir resultados semelhantes para o sistema usado neste trabalho.

A temperatura não está apenas influenciando no coeficiente de atenuação no ar, mas também na constante de proporcionalidade da fórmula para o tempo de reverberação (equação II.5), uma vez que esta constante foi definida com base na velocidade do som no ar, velocidade esta que depende da temperatura numa relação que pode ser simplificada pela expressão³¹:

$$c(T) = c_0 + 0,6T [\text{ } ^\circ \text{C}]$$

c_0 é a velocidade do som na temperatura de 0°C

A umidade influencia na densidade do ar e desta forma também contribui para a influência na velocidade de propagação do som e por conseguinte na constante de proporcionalidade.

IX-Conclusões

Foram estabelecidas as bases para o desenvolvimento de um novo método para medir o volume de combustível em tanques de veículos. O método se baseia na medida do tempo de reverberação de um recipiente, que contém líquido, excitado com um sinal sonoro de ultra-som em 40kHz.

Diversos experimentos foram realizados em sistemas de configurações distintas, utilizando-se um cilindro de alumínio, nos quais os transdutores de ultra-som foram instalados em disposições variadas. Todas as medidas foram feitas usando-se água em vez de combustível, por razões de segurança e facilidade de manuseio.

Os resultados destes experimentos nos permitiram concluir que o método é exequível desde que seja assegurado um campo sonoro difuso no interior do recipiente. Observou-se que a agitação permanente do líquido contribui para estabelecer esta condição e aumentar a precisão da medida.

Para criar tais condições no tanque de um veículo, que é a aplicação alvo do trabalho, propostas foram apresentadas.

Outro resultado importante dos experimentos foi a constatação de que o sistema pode ser calibrado com o ajuste de dois coeficientes que podem ser facilmente determinados a partir de medidas do volume num tanque protótipo.

Um sistema experimental, que inclui circuitos de condicionamento para os sinais envolvidos, e interface com um microcomputador, onde os processamentos necessários são efetuados, permitiu avaliar que o método propicia erros inferiores a 1% em condições de tanque quase cheio. O erro aumenta à medida em que o volume de líquido diminui, mas se mantém abaixo de 2 litros. Este resultado supera as características da maioria dos métodos utilizados na indústria automotiva contemporânea.

O emprego do método desenvolvido num dispositivo que possa ser industrializado, entretanto, requer a solução de alguns problemas identificados no decorrer do trabalho. É o caso, por exemplo, da exposição do transdutor de ultra-som ao combustível, que é um solvente.

Nesta fase experimental do trabalho foram utilizados componentes discretos para implementar o circuito que produz o sinal periódico de excitação do transdutor de ultra-som e os circuitos de condicionamento dos sinais do receptor. O processamento dos sinais envolvidos foi feito utilizando-se uma planilha de cálculos com dados oriundos da memória de um osciloscópio digital usado na digitalização do sinal de recepção. A seqüência deste trabalho prevê o desenvolvimento de uma versão mais apropriada, baseada no uso de um microprocessador ou mesmo num circuito integrado dedicado (ASIC).

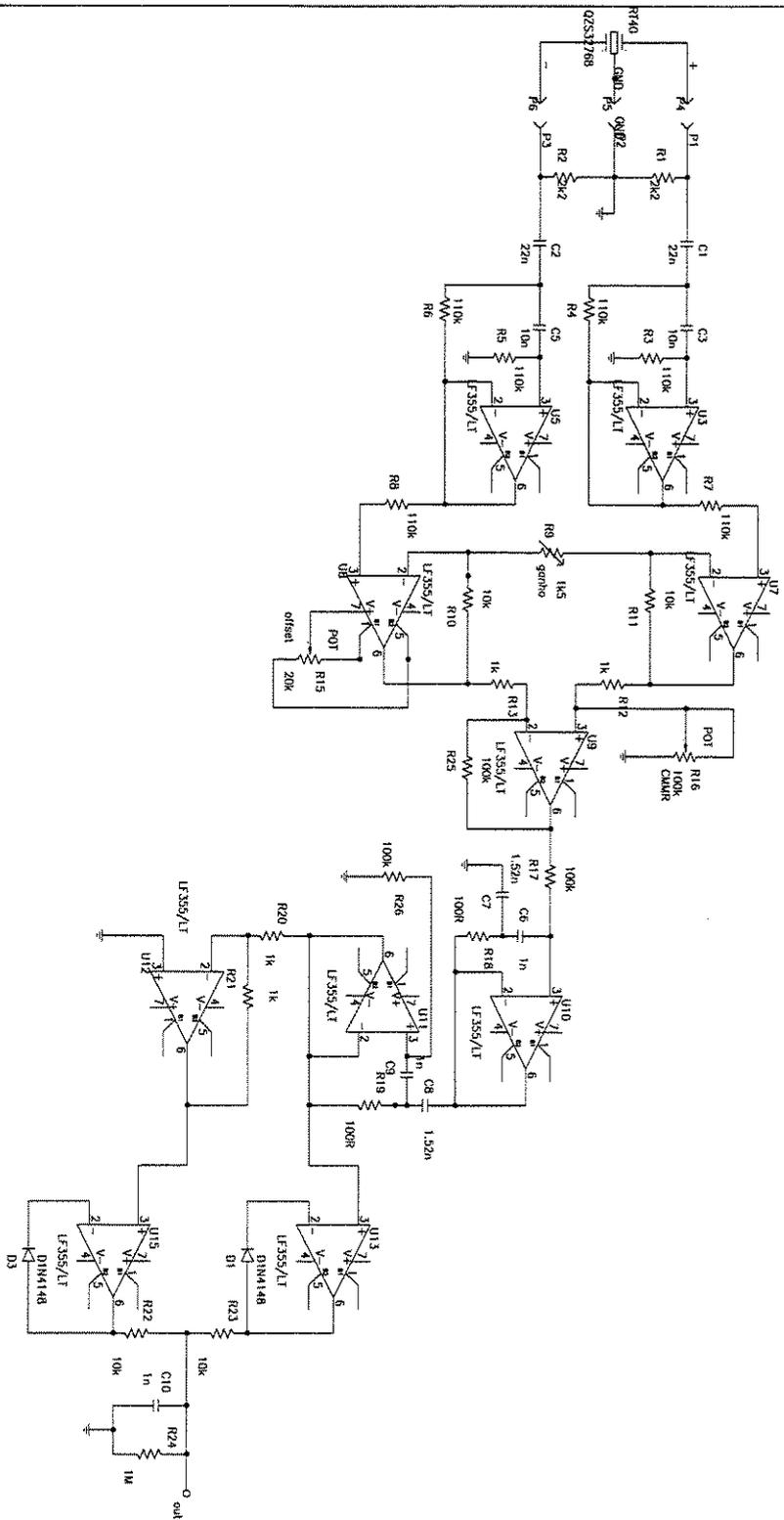
X-Referências bibliográficas

1. http://www.washtenaw.cc.mi.us/asv110/cwork/Chapter_06/fuelsystem.html
2. Johnson, C. D.- Process control instrumentation technology-Englewood Cliffs - Prentice Hall, 1988.
3. Barkhoudarian, S. – Non-Intrusive Fluid Measuring System – United States Patent number 4,296,472 – 1981
4. Kobayashi, H. – Fuel Gauge for an Automotive Vehicle – United States Patent number 4,531,407 – 1985
5. Stenvens, G. G. & Kennedy, R. C. – Liquid Storage Gauging Method and Apparatus – United States Patent number 4,553,216 – 1985
6. Ellinger, S. M. & Jones, H. P. – Ultrasonic Fuel Quantity Gauging – United States Patent number 4,815,323 - 1989
7. Gazis, D. C.; Kane, W. F.; Gutfeld, R. J. – Ultrasonic Liquid Level Gauge for Tanks Subject to Movement and Vibration – United States Patent number 5,793,705 – 1998
8. Prost, J. & Gross, D. – Method of and Apparatus for Determining the Level of Liquid in a Vessel – United States Patent number 4,535,637 – 1985
9. Bates, K. S. & Chang, D. B. – Low Frequency Acoustic Fuel Sensor – United States Patent number 5,251,482 - 1993
10. Rigden, J. S. – Physics and the Sound of Music – John Wiley & Sons, 2nd Edition, 1985
11. Rossi, M. – Acoustics and Electroacoustics – Artech House, 1988
12. Sabine, W. C. – Collected papers on Acoustics – Dover, 1964

13. Kuttruff, H. – Room Acoustics – Elsevier Applied Science, 3rd Edition, 1991
14. Abramovitz, M. & Stegun, I. A.- Hand Book of Mathematical Functions – Dover, 1972
15. Scheaffer, R. L. – Probability and Statistics for Engineers, 2nd Edition – Buxbury Press, 1986
16. Polack, J. D. – Experimental Validation of the Ergodic Theory of Reverberation – Acustica, Acta Acustica, pp S 154, Vol.52, Suppl. 1, 1996
17. Hodgson, M. – When is diffuse-field theory applicable?- Applied Acoustics 1996, Vol. 49, Iss3, pp 197-207
18. Kuttruff, H – Energetic Propagation in Rooms – Acustica 1997, Vol. 83, pp 622-628
19. Hodgson, M. - Experimental evaluation of the accuracy of the Sabine and Eyring theories in the case of non-low surface absorption – Journal of Acoustical Society of America 1993, Vol. 94 (2), pp 835-840
20. Swarthmore College, Engineering Methodology – Reverberation Lab – <http://www.fubini.swarthmore.edu/~ceverbal/Reverb.html>
21. Fothergill, L.C. – An Investigation of Simple Methods For Assessing Reverberation Time – Applied Acoustics 1982, Vol 15, Iss 1, pp 11-29
22. Mastraco, J. M. & Sneck, H. J. – The Role of the Microphone in the Measurement of Reverberation: An Application of the Scientific Method I – Acustica, Acta acustica 1997, Vol. 83, pp 284 - 296
23. Flenner J.P.; Guilhot J.P.; Legros C. – Dispersion des Mésures de la Durée de Réverbération d'un Local – Acustica 1982, Vol 50, Iss 3, pp 201-208
24. Kuttruff, H.; Straßen, Th.- Zur Abhängigkeit des Raumnachhalls von der Wanddiffusität und von der Raumform – Acustica 1980, Vol.45, pp 246-255

25. Nepomuceno, L.X.- Acústica Técnica – Etegil, 1968
26. Hodgson, M. – On measures to increase sound-field diffuseness and the applicability of the diffuse-field theory - Journal of Acoustical Society of America 1994, Vol. 95 (6), pp 3651-3653
27. Skarlatos, D. & Kostakis, D.- A Statistical Approach for the Diffusion of Sound by Reflecting Surfaces in Large Enclosures – Applied Acoustics 1996, Vol 47, Iss 1, pp 67-81
28. Benedetto, G. & Spanolo, R. – Reverberation time in enclosures: The surface reflection law and the dependence of the absorption coefficient on the angle of incidence - Journal of Acoustical Society of America 1985, Vol. 77 (4), pp 1447-1451
29. Bjor, O. & Hognestad, H. – A method for automatic reverberation time measurement – Applied Acoustics 1979, Vol. 12, pp 1-13
30. Kuttruff, H. – Zum Einfluß eines winkelabhängigen Schallabsorptionsgrades auf die Nachhallzeit – Acustica 1979, Vol 42, Iss 3, pp 187-188
31. Vukovic, D.; Sumarac, D.; Mijic, M.; Bagaric, I. – Influence of the Climatic Factors on the Reverberation Time – Acustica 1996, Vol. 82, Suppl.1, pp 154

ANEXO I



Lab. de Pesquisa Magneti Marelli
 Unicamp
 Projeto medidor de combustível
 Isidoro Ferreira da Silva
 Circuito condicionador de sinal
 Page Sheet Layout B
 Revision: - 1999 Page 01 of 01 1

ANEXO II

1	A = 0,0352	Des.médio	12,82	26	A = 0,0564	Des.médio	23,81
	B = 0,0004	Coef. Cor.	-0,06		B = 3,5996	Coef. Cor.	0,30
2	A = 0,0096	Des.médio	6,45	27	A = 0,0888	Des.médio	9,46
	B = -0,0568	Coef. Cor.	0,45		B = 4,0336	Coef. Cor.	0,72
3	A = 0,0001	Des.médio	7,81	28	A = 0,1316	Des.médio	9,58
	B = 0,0053	Coef. Cor.	0,49		B = 2,0596	Coef. Cor.	0,67
4	A = 0,0000	Des.médio	66,60	29	A = 0,0416	Des.médio	12,07
	B = 0,0061	Coef. Cor.	-0,26		B = 4,9110	Coef. Cor.	0,81
5	A = 0,2010	Des.médio	10,79	30	A = 0,0598	Des.médio	8,24
	B = 17,9949	Coef. Cor.	0,55		B = 5,2860	Coef. Cor.	0,92
6	A = 0,1164	Des.médio	8,00	31	A = 0,0687	Des.médio	7,71
	B = 4,2694	Coef. Cor.	0,53		B = 4,2237	Coef. Cor.	0,89
7	A = 0,0026	Des.médio	9,12	32	A = 0,0338	Des.médio	17,78
	B = 4,0385	Coef. Cor.	0,34		B = 6,1816	Coef. Cor.	0,52
8	A = -0,0724	Des.médio	7,40	33	A = 0,0790	Des.médio	4,37
	B = 10,6225	Coef. Cor.	0,89		B = 3,3975	Coef. Cor.	0,97
9	A = 0,2189	Des.médio	3,14	34	A = -0,2470	Des.médio	16,31
	B = -2,3531	Coef. Cor.	0,80		B = 28,1468	Coef. Cor.	0,36
10	A = 0,0543	Des.médio	9,26	35	A = -0,0555	Des.médio	57,12
	B = 4,0222	Coef. Cor.	0,52		B = 19,8159	Coef. Cor.	0,58
11	A = 0,0353	Des.médio	20,75	36	A = 0,0525	Des.médio	15,57
	B = 4,1241	Coef. Cor.	0,53		B = 0,2439	Coef. Cor.	0,65
12	A = 0,0751	Des.médio	17,25	37	A = 0,0187	Des.médio	75,39
	B = 3,9380	Coef. Cor.	0,45		B = 17,1159	Coef. Cor.	-0,19
13	A = -0,0415	Des.médio	19,95	38	A = 0,4850	Des.médio	11,24
	B = 7,7766	Coef. Cor.	0,06		B = 4,5000	Coef. Cor.	0,27
14	A = 0,1092	Des.médio	1,75	39	A = 0,0080	Des.médio	96,60
	B = 1,0411	Coef. Cor.	0,92		B = 18,5024	Coef. Cor.	0,38
15	A = 0,0176	Des.médio	16,06	40	A = -0,0167	Des.médio	114,21
	B = 4,4999	Coef. Cor.	0,47		B = 10,5700	Coef. Cor.	0,16
16	A = -0,0471	Des.médio	16,61	41	A = 0,1107	Des.médio	58,13
	B = 9,9831	Coef. Cor.	0,46		B = 6,1070	Coef. Cor.	0,39
17	A = 0,1619	Des.médio	8,95	42	A = 0,0644	Des.médio	11,07
	B = 2,0178	Coef. Cor.	0,69		B = -0,5840	Coef. Cor.	0,60
18	A = 0,1246	Des.médio	9,25	43	A = -0,0633	Des.médio	33,21
	B = 2,8955	Coef. Cor.	0,72		B = 6,6638	Coef. Cor.	0,55
19	A = 0,0118	Des.médio	50,78	44	A = 0,0081	Des.médio	84,46
	B = 7,4014	Coef. Cor.	-0,02		B = 11,0348	Coef. Cor.	-0,42
20	A = 0,1550	Des.médio	4,85	45	A = 0,2223	Des.médio	25,17
	B = 0,4728	Coef. Cor.	0,90		B = -2,3651	Coef. Cor.	0,26
21	A = 0,0541	Des.médio	6,04	46	A = 0,1537	Des.médio	0,98
	B = 4,7644	Coef. Cor.	0,67		B = 3,3382	Coef. Cor.	0,98
22	A = 0,1516	Des.médio	2,27	47	A = 0,1879	Des.médio	2,07
	B = 1,5236	Coef. Cor.	0,97		B = 2,1989	Coef. Cor.	0,96
23	A = 0,0181	Des.médio	41,75	48	A = 0,1690	Des.médio	2,73
	B = 1,0100	Coef. Cor.	0,10		B = 3,0307	Coef. Cor.	0,94
24	A = 0,2405	Des.médio	6,66	49	A = 0,0915	Des.médio	4,71
	B = -5,0021	Coef. Cor.	0,75		B = 5,2433	Coef. Cor.	0,86
25	A = -0,0046	Des.médio	68,29	50	A = 0,1887	Des.médio	1,07
	B = 3,2003	Coef. Cor.	0,50		B = 1,8591	Coef. Cor.	0,99

51	A=	0,1066	Des.médio	3,01	76	A=	0,0840	Des.médio	2,90
	B=	4,9118	Coef. Cor.	0,91		B=	6,9323	Coef. Cor.	0,90
52	A=	0,0883	Des.médio	2,22	77	A=	0,0080	Des.médio	96,60
	B=	4,7137	Coef. Cor.	0,90		B=	18,5024	Coef. Cor.	0,38
53	A=	0,0746	Des.médio	3,89	78	A =	0,0605	Des.médio	2,86
	B=	6,3527	Coef. Cor.	0,75		B =	8,3987	Coef. Cor.	0,84
54	A=	0,0133	Des.médio	39,10	79	A=	0,0010	Des.médio	9,45
	B=	7,3275	Coef. Cor.	-0,01		B=	0,9614	Coef. Cor.	0,73
55	A=	0,0219	Des.médio	29,17	80	A=	-0,0007	Des.médio	9,89
	B=	2,2721	Coef. Cor.	0,11		B=	0,9037	Coef. Cor.	0,74
56	A=	0,0920	Des.médio	14,98	81	A =	0,0108	Des.médio	28,72
	B=	9,5778	Coef. Cor.	0,36		B =	9,7124	Coef. Cor.	0,21
57	A=	0,1038	Des.médio	9,60	82	A=	0,0494	Des.médio	11,41
	B=	10,3512	Coef. Cor.	0,70		B=	7,7865	Coef. Cor.	0,42
58	A=	0,1898	Des.médio	0,94	83	A =	0,1017	Des.médio	2,35
	B=	10,4407	Coef. Cor.	0,99		B =	6,6637	Coef. Cor.	0,98
59	A=	0,1097	Des.médio	1,82	84	A =	0,0835	Des.médio	1,72
	B=	8,9414	Coef. Cor.	0,98		B =	6,6032	Coef. Cor.	0,99
60	A=	0,1190	Des.médio	2,62	85	A =	0,0844	Des.médio	2,08
	B=	12,7307	Coef. Cor.	0,95		B =	6,6644	Coef. Cor.	0,99
61	A=	0,1029	Des.médio	4,70	86	A=	0,0796	Des.médio	3,48
	B=	7,0966	Coef. Cor.	0,87		B=	6,0143	Coef. Cor.	0,98
62	A=	0,0586	Des.médio	43,77	87	A =	0,0861	Des.médio	1,44
	B=	12,0544	Coef. Cor.	0,06		B =	5,9260	Coef. Cor.	0,97
63	A=	0,2143	Des.médio	1,42	88	A=	0,0796	Des.médio	3,48
	B=	6,0959	Coef. Cor.	0,99		B=	6,0143	Coef. Cor.	0,98
64	A=	0,1092	Des.médio	1,75	89	A=	0,1120	Des.médio	1,32
	B=	1,0411	Coef. Cor.	0,92		B=	9,2106	Coef. Cor.	0,95
65	A =	0,0977	Des.médio	1,70	90	A=	0,0580	Des.médio	3,26
	B =	7,6936	Coef. Cor.	0,98		B=	10,8869	Coef. Cor.	0,93
66	A =	0,1135	Des.médio	2,39	91	A=	0,0661	Des.médio	2,67
	B =	9,0911	Coef. Cor.	0,90		B=	4,9345	Coef. Cor.	0,96
67	A =	0,2903	Des.médio	4,22	92	A=	0,0676	Des.médio	2,99
	B =	2,2490	Coef. Cor.	0,93		B=	5,4775	Coef. Cor.	0,96
68	A=	0,0150	Des.médio	64,69	93	A=	0,0475	Des.médio	3,95
	B=	10,5632	Coef. Cor.	0,20		B=	6,7268	Coef. Cor.	0,94
69	A=	0,1289	Des.médio	2,72	94	A=	0,0558	Des.médio	3,95
	B=	8,1319	Coef. Cor.	0,94		B=	5,9122	Coef. Cor.	0,98
70	A=	0,0796	Des.médio	3,48	95	A=	0,0822	Des.médio	1,78
	B=	6,0143	Coef. Cor.	0,98		B=	5,4067	Coef. Cor.	0,99
71	A=	0,0714	Des.médio	1,74	96	A=	0,0661	Des.médio	3,39
	B=	6,5802	Coef. Cor.	0,97		B=	7,2378	Coef. Cor.	0,86
72	A=	0,0360	Des.médio	3,97	97	A=	0,0637	Des.médio	4,52
	B=	6,2636	Coef. Cor.	0,88		B=	8,7659	Coef. Cor.	0,94
73	A=	0,0814	Des.médio	13,33	98	A=	0,0810	Des.médio	2,97
	B=	7,0616	Coef. Cor.	0,41		B=	5,9757	Coef. Cor.	0,98
74	A=	0,1065	Des.médio	1,64	99	A=	0,0577	Des.médio	7,22
	B=	6,0961	Coef. Cor.	0,97		B=	4,8088	Coef. Cor.	0,86
75	A=	0,2381	Des.médio	3,60	100	A=	0,0742	Des.médio	13,25
	B=	1,4421	Coef. Cor.	0,90		B=	5,2747	Coef. Cor.	0,88