Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço...09/05/06

Ass.: Renato

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANALISE DA IMPEDÂNCIA ACÚSTICA NA GASOLINA

Karina Zoboli Buttarello

Orientador: Assoc. Paulo Seleglim Jr.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100053771

Dissertação apresentada à
Escola de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de São
Paulo, como parte dos
requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia
Mecânica.

São Carlos

-2003-

Class.	TESE ✓
Cutt.	1005
Tombo	T094/06
Sysno	1515229

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B988a Buttarello, Karina Zoboli
Análise da impedância acústica na gasolina / Karina
Zoboli Buttarello. -- São Carlos, 2003.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.
Área: Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Paulo Seleguin Jr.

1. Impedância acústica. 2. Coeficiente de reflexão.
3. Gasolina. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharel **KARINA ZOBOLI BUTTARELLO**

Dissertação defendida e julgada em 03-10-2003 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Assoc. **PAULO SELEGHIM JUNIOR (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

Prof. Dr. **SERGIO RODRIGUES FONTES**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

Prof. Dr. **ANTONIO CARLOS BANNWART**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADA

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Aos meus pais
Antonio e Teresa

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Assoc. Paulo Seleghim Jr. Pela orientação e paciência .

Aos meus pais que em tudo me apoiaram.

A todos colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica e Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos da EESC-USP.

A todos os meus amigos de São Carlos pelo companheirismo e ajuda de modo especial a duas grandes amigas Jaciara e Gianna.

SUMÁRIO

1-Introdução.....	1
2-Objetivos.....	5
3-Metodologia.....	6
3.1-Equações de propagação acústica.....	6
3.2- Estratégia de sensoriamento.....	10
3.2.1 UPER.....	15
3.2.2 Dois Guias de Atraso.....	17
3.2.3 Método Adotado.....	18
3.3-Processamento de sinais.....	20
4-Experimentos e resultados.....	25
4.1 Descrição dos ensaios.....	25
4.2 Erro na velocidade do som.....	29
4.3 Erro na impedância acústica.....	35
5-Conclusões.....	52
5-Referências bibliográficas.....	53

Lista de Figuras

Figura 1 Sensor de Mcclements e Fairley.....	11
Figura 2 Sensor de Adamowski.....	11
Figura 3 Sensor com líquido primeiro.....	12
Figura 4 Sensor com dois formatos.....	13
Figura 5 Sensor com duas impedâncias.....	14
Figura 6 Sensor duas partes.....	15
Figura 7 Uper	16
Figura 8 Diagrama do Uper.....	16
Figura 9 Sensor de ecos com dois guias de atraso.....	17
Figura 10 Diagrama de ecos do experimento.....	18
Figura 11 recipiente usado no experimento.....	19
Figura 12 Exemplo de um sinal com ecos múltiplos.....	19
Figura 13 Exemplo de eco principal e eco secundário.....	20
Figura 14 Forma de onda.....	20
Figura 15 Sinal evidenciando os picos principais.....	21
Figura 16 Sinal após todo processamento.....	22
Figura 17 Painel frontal.....	23
Figura 18 Diagrama de blocos do programa.....	24
Figura 19 Recipiente usado no experimento.....	29

Figura 20 Gráfico da variação da velocidade do som na gasolina pura com acréscimo de álcool anidro.....	31
Figura 21 Gráfico da variação da velocidade do som na gasolina comum com acréscimo de óleo diesel.....	32
Figura 22 Gráfico da variação da velocidade do som na gasolina comum com acréscimo de querosene.....	33
Figura 23 Gráfico da variação da velocidade do som na gasolina comum com acréscimo de álcool anidro.....	34
Figura 24 Gráfico da variação da velocidade do som na gasolina pura com acréscimo de tolueno.....	35
Figura 25 Gráfico da variação da impedância acústica na gasolina pura com acréscimo de álcool anidro.....	37
Figura 26 Gráfico da variação da impedância acústica na gasolina comum com acréscimo de óleo diesel.....	38
Figura 27 Gráfico da variação da impedância acústica na gasolina comum com acréscimo de querosene.....	39
Figura 28 Gráfico da variação da impedância acústica na gasolina comum com acréscimo de álcool anidro.....	40
Figura 29 Gráfico da variação da impedância acústica na gasolina pura com acréscimo de tolueno.....	41
Figura 30 Gráfico da variação densidade na gasolina pura com acréscimo álcool anidro.....	41
Figura 31 Gráfico da variação densidade na gasolina comum com acréscimo óleo diesel.....	42
Figura 32 Gráfico da variação densidade na gasolina comum com acréscimo querosene.....	42
Figura 33 Gráfico da variação densidade na gasolina comum com acréscimo álcool anidro.....	43
Figura 34 Gráfico da variação densidade na gasolina com acréscimo de tolueno.....	43

Figura 35 Gráfico que compara o coeficiente de reflexão obtido pelo programa e obtido pelo método direto da gasolina com acréscimo de álcool anidro.....	44
Figura 36 Gráfico que compara o coeficiente de reflexão obtido pelo programa e obtido pelo método direto da gasolina com acréscimo de óleo diesel.....	45
Figura 37 Gráfico que compara o coeficiente de reflexão obtido pelo programa e obtido pelo método direto da gasolina com acréscimo de querosene.....	45
Figura 38 Gráfico que compara a impedância acústica obtido pelo programa e obtido pelo método direto da gasolina com acréscimo de álcool anidro.....	48
Figura 39 Gráfico que compara a impedância acústica obtido pelo programa e obtido pelo método direto da gasolina com acréscimo de óleo diesel.....	48
Figura 39 Gráfico que compara a impedância acústica obtido pelo programa e obtido pelo método direto da gasolina com acréscimo de óleo diesel.....	48
Figura 40 Gráfico que compara a impedância acústica obtido pelo programa e obtido pelo método direto da gasolina com acréscimo de querosene.....	49
Figura 41 Gráfico da variação da velocidade do som no petróleo aumentando a temperatura.....	50
Figura 42 Gráfico da variação da impedância acústica no petróleo aumentando a temperatura.....	51

Lista de Tabelas

Tabela 01-Densidade das amostras de gasolina pura e álcool anidro.....	26
Tabela 02-Densidade das amostras de gasolina comum e óleo diesel.....	2 6
Tabela 03-Densidade das amostras de gasolina comum e querosene.....	2 7
Tabela 04-Densidade das amostras de gasolina comum e álcool anidro.....	2 7
Tabela 05-Densidade das amostras de gasolina pura e tolueno.....	2 8
Tabela 06-Velocidade do som na gasolina pura com álcool anidro.....	31
Tabela 07-Velocidade do som na gasolina comum com óleo diesel.....	32
Tabela 08-Velocidade do som na gasolina comum com querosene.....	33
Tabela 09-Velocidade do som na gasolina comum com álcool anidro.....	34
Tabela 10-Velocidade do som na gasolina pura com tolueno.....	35
Tabela 11-Impedância Acústica da gasolina pura com álcool anidro.....	36
Tabela 12-Impedância Acústica da gasolina comum com óleo diesel.....	37
Tabela 13-Impedância Acústica da gasolina comum com querosene.....	38
Tabela 14-Impedância Acústica da gasolina comum com álcool anidro.....	39
Tabela 15-Impedância Acústica da gasolina pura com tolueno.....	40

Lista de Abreviaturas e Siglas

EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
NETeF	Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos
USP	Universidade de São Paulo
UPER	Ultrasonic Pulse Echo Reflectometer

Lista de Símbolos

Z	Impedância Acústica g.m/mls
ρ	Densidade g/ml
c	Velocidade do Som m/s
P	Pressão Acústica
ω	Frequência Instantânea
A	Amplitude
I	Intensidade Acústica
R	Coefficiente de Reflexão
T	Coefficiente de Transmissão
σ	Contraste Acústico
Ψ	Forma de Onda
x	Modelo de sinais de ecos múltiplos
$R_{x\Psi}$	Correlação
Z_x	Sinal Analítico associado a Correlação
$H[R_{x\Psi}]$	Transformada de Hilbert
Δc	Erro na velocidade do som
L_1	Espessura do recipiente de aço inox
L_2	Distância da base do recipiente até a altura da amostra dentro do recipiente
T_1	Tempo que o som leva para atravessar a base do recipiente
T_2	Tempo que o som leva para percorrer a amostra
ΔL_2	Erro na medida de L_2

ΔT_1	Erro na medida de T_1
ΔT_2	Erro na medida de T_2
ΔZ	Erro na medida da impedância acústica
$\Delta \rho$	Erro na medida da densidade
ΔR	Erro na medida do coeficiente de reflexão

RESUMO

BUTTARELLO, K.Z. (2003). *Análise da impedância acústica na gasolina*. São Carlos, 2003. 67p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho analisa a qualidade dos combustíveis derivados de petróleo através de suas propriedades acústicas, visando assim um monitoramento contínuo e instantâneo.

Analisa a variação da impedância acústica da gasolina com acréscimo de vários componentes como: tolueno, óleo diesel, querosene, e álcool anidro. Os resultados obtidos mostram uma variação significativa embora não linear da impedância acústica nos combustíveis derivados de petróleo com acréscimo de tais substâncias.

Palavras-chave: impedância acústica, coeficiente de reflexão, gasolina.

ABSTRACT

BUTTARELLO, K.Z. (2003). Acoustic impedance Analysis of gasoline .São Carlos, 2003. 67p. MSc dissertation – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo.

This work is related with research project focused on the development of low cost and robust quality monitoring equipment and methods, suitable for application in the production of petrochemical compounds. The main objective of this work is to assess the quality of automotive gasoline through the analysis of its acoustic properties. More specifically, pure gasoline's acoustic impedance (defined as the product between its density and the velocity of propagation of an acoustic wave) is analyzed with respect to the addition of toluene, kerosene, ethanol and diesel fuel. Results show that the acoustic impedance is sensitive to the addition of such components, although this relation may be non-linear in some cases.

Keywords: acoustic impedance, gasoline, reflection coefficient.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O diagnóstico da qualidade dos combustíveis derivados de petróleo é particularmente importante na conservação de motores de combustão interna de alta eficiência energética e baixa emissão de poluentes. É evidente a necessidade de se desenvolver equipamentos de análise em linha e de baixo custo, visando seu emprego maciço tanto nos processos de produção de combustíveis derivados de petróleo quanto diretamente nas bombas de abastecimento.

Uma maneira de diagnosticar a qualidade destes combustíveis é analisar sua composição. Existem inúmeros métodos de se fazer isso, mas como nosso interesse é desenvolver um sistema que possa ser lido diretamente nas bombas de combustíveis, ou remotamente pelos fiscais via internet, estamos interessados em desenvolver técnicas analíticas indiretas. Técnicas analíticas diretas tradicionalmente utilizadas em laboratórios não são adequadas devido a uma série de fatores:

- longo tempo de espera;
- necessidade de um controle rigoroso nas condições experimentais;
- geração de resíduos, consumo de reagentes químicos;

Ao contrário disso, estamos sugerindo a utilização de técnicas analíticas indiretas baseadas na interação do meio analisado com campos de sensoriamento capazes de extrair respostas características. Recentemente nos diversos setores industriais tem sido utilizado sensores químicos, mas estes entram em contato com o líquido influenciando o resultado. Uma alternativa para isso é o desenvolvimento de um sensor acústico, baseado em campos ultrassônicos capaz de medir a densidade dos combustíveis derivados do petróleo de forma não intrusiva e não invasiva.

Esta abordagem apresenta as seguintes vantagens:

- evitar o contato direto do elemento sensor com os fluidos sensorizados;
- resultado instantâneo;
- garante a qualidade do produto;
- robustez e imunidade a ruídos elétricos;
- baixo custo e facilidade de industrialização;

Como desvantagem podemos listar o seguinte:

- Necessidade de cálculos adicionais posteriores;
- Em geral as propriedades acústicas não são lineares o que dificulta a interpretação dos resultados;
- Medida indireta;

Este projeto insere-se dentro de outro projeto denominado Degustador, que tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema para monitoração da qualidade de derivados de petróleo que possa ser instalado na bomba de combustível e lido diretamente pelo consumidor e/ou remotamente via internet, pelos agentes de fiscalização. O projeto Degustador consta de vários sensores tais como: acústico, condutância elétrica, absorvância e turbidez. Neste contexto, é proposta a determinação da densidade através de suas propriedades acústicas a fim de se obter um monitoramento contínuo.

O sensoriamento acústico vem sendo usado em outros setores industriais como os citados abaixo:

Industria Química:

-Polimerização: monitoração na reação de polimerização ou reaproveitamento de material;

-Processo Galvânico: medidas em linha de eletrólitos ou concentração de ácidos;

-Industria de metal: determinação da perda de concentração em verniz e pinturas;

-Industrias primarias: medida da concentração de potássio e cloreto de sódio;

-Perda de água no tratamento: monitoração da perda de água no tratamento;

-Processo industrial de pinturas;

Industria Alimentícia

-Industria de bebidas: determinação da relação de concentração em bebidas ou sucos;

-Produção de amido: análise na composição de amido;

-Laticínios: medida na concentração de gordura não sólida;

-Biotecnologia: monitoração na fermentação alcoólica e láctica, determinação da concentração em enzima.(Henning et al 2000)

Na literatura são encontradas várias citações de como medir a densidade de um fluido usando suas propriedades acústicas, tais como impedância acústica e velocidade do som. A determinação da densidade através de seus parâmetros acústicos foi realizada com sucesso e a densidade encontrada através do método proposto é muito próxima da densidade previamente calculada.

No capítulo 3 a metodologia e o programa usados serão explicados e maneiras distintas de se manipular as reflexões acústicas serão mostradas. No capítulo 4 é apresentado a descrição do experimento e os resultados obtidos .

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

Este trabalho insere-se em um projeto de pesquisa em curso no Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, denominado Degustador. O objetivo deste projeto, como já foi dito é o de diagnosticar qualidade dos combustíveis derivados de petróleo, visando o desenvolvimento de “instrumento analíticos de operação em linha, de baixo custo para instalação em bombas de abastecimento de combustíveis .

Em particular este trabalho se refere ao sensoriamento acústico, ou seja, queremos medir a densidade usando o sensoriamento acústico.

Para isso podem ser listados alguns objetivos mais específicos:

- medir a variação da velocidade do som e impedância acústica nos combustíveis derivados de petróleo em relação ao acréscimo de contaminantes;
- medir a densidade usando o sensor acústico;
- testar a viabilidade do uso do ultra-som na determinação da presença de contaminantes no combustível derivado de petróleo.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Equações de propagação acústica

“Quando uma onda sonora passa através de um fluido, sua densidade, pressão e temperatura locais variam periodicamente com relação ao tempo. Numa primeira aproximação, é possível assumir que estas variações ocorrem de forma adiabática e reversível devido à alta frequência da oscilação. Assim sendo, uma onda harmônica plana pode viajar sem ser atenuada de forma significativa, e com uma velocidade definida pela compressibilidade e pela equação de estado do fluido”.(Seleghim 2002).

Uma descrição matemática para este movimento pode ser construída a partir das leis de conservação de massa e energia, especificadas para um fluido ideal não viscoso e não absoritivo, relativamente a variações de primeira ordem nas variáveis fluidodinâmicas. Isso justificativa a idéia de usar a análise de propagação acústica como técnica básica para a medida de densidade em fluidos condutores de ultrassom.”(Seleghim2002).

Levando em consideração características do ultra-som, é necessário considerar também a interação acústica entre o fluido e suas interfaces, definida de maneira geral, pelas superfícies de contato. O comportamento do ultra-som é fundamentalmente regido pelo par de impedâncias acústicas Z , definidas como sendo o produto entre a densidade ρ e a velocidade de propagação acústica c de cada meio, ou seja,

$$Z = \rho \cdot c \quad (3.1)$$

Além disso, equações matemáticas que regem o fenômeno permitem estabelecer expressões para o cálculo da pressão acústica P e da intensidade acústica I , esta última definida como a taxa de fluxo de energia acústica por unidade de área, em função da amplitude A e da frequência ω da onda incidente.

$$P = \omega A Z \quad (3.2)$$

$$I = \frac{1}{2} \omega^2 A^2 Z \quad (3.3)$$

Quando uma onda acústica incide perpendicularmente sobre uma interface entre um meio A e outro meio B, uma parte da energia é refletida e a restante é transmitida. O quanto é transmitido e o quanto é refletido depende da impedância de cada meio. A proporção entre a pressão acústica das ondas refletidas (P_r) e incidentes (P_i) define o coeficiente de reflexão R_p expresso por :

$$R_p = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_a - Z_b}{Z_a + Z_b} \quad (3.4)$$

Manipulando a equação de pressão acústica dada acima temos que R_p pode ser expresso da seguinte forma

$$R_p = \frac{A_r}{A_i} = \frac{Z_a - Z_b}{Z_a + Z_b} \quad (3.5)$$

onde subentende-se que a onda se propaga de A para B. Analogamente, é possível determinar o coeficiente de transmissão T_p como sendo o quociente entre as pressões acústicas transmitidas (P_t) e incidentes (P_i), ou seja,

$$T_p = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_b}{Z_a + Z_b} \quad (3.6)$$

Ainda manipulando a equação acima ficamos com

$$T_p = \frac{A_t}{A_i} = \frac{2Z_b}{Z_a + Z_b} \quad (3.7)$$

Com isso, podemos obter tanto o coeficiente de reflexão como o de transmissão através das amplitudes. Em termos de intensidade acústica, a reflexão e a transmissão acústica são quantificadas respectivamente pelos coeficientes R_i e T_i dados por :

$$R_i = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{Z_a - Z_b}{Z_a + Z_b} \right)^2 \quad (3.8)$$

$$T_i = \frac{I_r}{I_i} = \frac{4Z_a Z_b}{(Z_a + Z_b)^2} \quad (3.9)$$

“Estas expressões mostram que tanto as pressões quanto as intensidades acústicas refletidas e transmitidas totalizam os respectivos valores incidentes, significando que há equilíbrio de forças e conservação de energia na interface entre os meios A e B. Entretanto, apesar dos coeficientes T_p , R_i e T_i , serem indiferentes à relação entre as impedâncias, R_p pode ser negativo.” (Selegim, 2002).

Mais especificamente, se $Z_a > Z_b$, decorre que $R_p > 0$, o que indica que a pressão relativa das ondas refletida e incidente será positiva. Caso contrário, a pressão relativa será negativa, o que significa que há reversão de fase, regiões do meio A que sofreram compressão devido à onda incidente passam a ser descomprimidas ou rarefeitas quando da passagem da onda refletida.

A análise da relação entre as impedâncias, melhor expressa através do contraste acústico σ definido como :

$$\sigma = \frac{Z_a}{Z_b} \quad (3.10)$$

é de grande importância para o projeto de sensores acústicos, principalmente quando não pode haver contato direto entre o elemento sensor e o meio investigado.

Tendo em vista nosso objetivo que é, medir a densidade dos combustíveis derivados de petróleo, a partir de suas propriedades acústicas, utilizando a equação

(3.1), nosso problema se reduz a determinar a velocidade de propagação acústica (c) no combustível e sua impedância acústica (Z).

Para medirmos c é necessário apenas conhecer o tempo de transito ao longo de um caminho conhecido. Enquanto Z pode ser determinado pelo seu coeficiente de reflexão ou pelo seu coeficiente de transmissão. Nosso estudo se baseia na determinação de Z através do seu coeficiente de reflexão. Manipulando a equação (3.5) ficamos com

$$Z_r = Z_i \left(\frac{1-R}{1+R} \right) \quad (3.11)$$

para o cálculo de R foi usada a amplitude do pulso incidente e do pulso refletido.

3.2 Estratégia de sensoriamento

A maneira de medir a densidade através de suas propriedades acústicas é a mesma citada acima o que varia é o modo de manipular as reflexões acústicas.

Muitos sensores foram construídos no passado com o objetivo de medir o coeficiente de reflexão, uma vez que é através deste que se determina a impedância acústica.

A seguir mostraremos algumas figuras esquematizando o modo de manipular as reflexões acústicas, nas figuras abaixo o líquido, as impedâncias e o transdutor serão representados pela seguinte maneira.

Figura 1: sensor de McClements e Fairley (Püttmer et al, 2000).

O esquema da figura 1 foi proposta por McClements e Fairley para calcular o coeficiente de reflexão pela voltagem transmitida e recebida pelo transdutor piezoceramica operando no modo pulso eco. A partir daí, o transdutor envia o sinal este atravessa o meio com impedância Z_0 , chegando na interface com o líquido, uma parte é transmitida outra é refletida, a parte refletida gera o primeiro eco, a parte transmitida viaja no líquido até encontrar o refletor, onde ocorre reflexão total. O processo se repete gerando assim o segundo eco, estes dois ecos estão representados na figura acima. Este sensor exigia freqüentes calibrações

Figura 2: sensor de Adamowski (Püttmer et al, 2000).

A figura 2 mostra uma implementação usando piezocerâmica para transmitir e PVDF para receber, isto foi introduzido por Adamowski. Nesse caso o transdutor envia o sinal que atravessa o meio Z_0 encontrando nesse meio uma membrana de PVDF o sinal quando chega na interface com o líquido uma parte é transmitida e outra é refletida. A parte refletida gera o primeiro eco, a parte transmitida viaja pelo líquido até encontrar o refletor onde ocorre reflexão total, gerando o segundo eco. O processo se repete e são gerados dois ecos, representados na figura acima. Esse tipo de sensor tinha suas aplicações industriais limitadas devido o fato do PVDF não suportar altas temperaturas.

Figura 3: sensor com líquido primeiro (Püttmer et al, 2000).

Na figura 3 o transdutor envia a onda acústica direto no líquido e esta viaja até chegar na interface com o meio com impedância Z_0 , onde uma parte é transmitida a outra é refletida, gerando assim o primeiro eco. A parte transmitida viaja no meio com impedância Z_0 até chegar na interface com o ar, onde novamente uma parte é transmitida a outra é refletida. A parte refletida quando chega na interface com o líquido novamente uma parte é transmitida outra refletida, a parte transmitida gera o segundo pulso e a parte transmitida gera o terceiro pulso, representados na figura acima.

Figura 4: sensor com dois formatos (Püttmer et al, 2000).

Na figura 4 o transdutor envia a onda acústica no meio com impedância Z_0 este viaja até chegar na interface, onde uma parte é transmitida e outra é refletida, gerando aí o primeiro eco, a parte transmitida viaja até chegar na interface com o líquido onde novamente uma parte é transmitida e outra é refletida gerando assim o segundo eco, a parte transmitida viaja no líquido até chegar no refletor onde sofre reflexão total gerando assim o terceiro eco. O esquema está representado na figura acima.

Figura 5: sensor com duas impedâncias (Püttmer et al, 2000).

Na figura 5 o transdutor envia a onda acústica no meio com impedância Z_0 este viaja até chegar no meio com impedância Z_1 onde uma parte é transmitida e outra é refletida, a parte refletida gera o primeiro eco, a parte transmitida viaja no meio com impedância Z_1 até chegar na interface com o líquido onde novamente uma parte é transmitida e outra é refletida, a porção refletida gera o segundo eco, a parte transmitida viaja no líquido até chegar no refletor onde sofre reflexão total gerando assim o terceiro eco.

As figuras acima mostraram seis modos diferente de manipular o sinal. Estes sensores não proporcionavam uma alta qualidade na medida do coeficiente de reflexão além do que, tinham sua utilização no setor industrial limitada.

Abaixo mostraremos figuras dos sensores que faziam sua aquisição acústica da maneira citada anteriormente.

3.2.1 Sensor de duas partes

Este sensor consiste de duas partes, o Z-sensor para medir a impedância acústica e o c-sensor para medir a velocidade do som no fluido. Um disco piezocerâmica é usado para transmitir e receber o ultra-som no Z-sensor. O guia de atraso no referencial é fixado ao lado do disco piezocerâmica, este disco gera uma

configuração idêntica ao sinal do guia de atraso. O par de sinais acústico viaja com a mesma velocidade, refletem no final do guia de atraso e são recebidos em tempos diferentes, devido à diferença de comprimento nos guias de atraso. (Püttmer et al, 2000).

Figura 6: sensor com duas partes

3.2.2 UPER (ultra-som pulso eco refletômetro)

O transdutor gera um pulso de ultra-som que viaja ao longo do guia de atraso, até a interface com o fluido onde é parcialmente transmitida. A porção transmitida viaja pelo fluido e é refletida pelo refletor. Os pulsos refletidos nas duas interfaces viajam pelo transdutor e são detectados pelo osciloscópio.

Figura 7: pulso eco refletômetro (McClements & Fairley, 1990).

Figura 8: diagrama dos ecos no UPER (McClements & Fairley, 1990).

3.2.3 Dois guias de atraso

O transdutor de cerâmica transmite um pulso de ultra-som, este viaja pelo primeiro guia de atraso e chega ao transdutor de PVDF, o pulso viaja pelo segundo guia de atraso, até chegar na interface com o líquido, onde é parcialmente refletido e parcialmente transmitido, a parte refletida volta até o transdutor de PVDF, a parte transmitida viaja novamente pelo líquido até chegar na interface do líquido com o segundo guia de atraso, novamente uma parte é transmitida outra é refletida, isso ocorre sucessivamente.

Figura. 9: diagrama dos ecos com dois guias de atraso(Adamowski et al ,1994).

3.2.4 Método adotado

Para seção de testes foram usados um recipiente de aço inox com formato cilíndrico, com altura de 9,9cm e diâmetro de 7,6cm sua base era um disco com espessura de 1,3cm (permitindo assim que a onda acústica refletisse na interface da base com o fluido) ao qual estava conectado um transdutor piezocerâmica da Panametrics, modelo A-308-SU. Ainda para aquisição dos dados foi usado um equipamento pulser/receiver-model 508 Panametrics, aparelho que gera e recebe o pulso de ultra-som. O sinal é enviado ao osciloscópio onde é transformado em gráfico o mesmo e envia ao computador onde o sinal vai ser processado pelo programa ecos múltiplos GPIB otimizado.vi descrito na seção seguinte.

Os equipamentos estão ligados em serie pelo sistema GPIB.

O transdutor gera um pulso de ultra-som que viaja ao longo do guia de lamina de aço inox com espessura de 1,3cm até a interface com o fluido onde uma parte é transmitida e a outra é refletida. A porção transmitida viaja pelo fluido quando chega na interface com o ar considera-se que aconteça reflexão total uma vez que a impedância acústica do ar é muito menor que a do fluido. Os pulsos refletidos nas duas interfaces viajam pelo transdutor e são detectados pelo osciloscópio.

Figura 10: diagrama dos ecos no experimento.

Figura 11: recipiente usado para o experimento.

Figura 12: exemplo de um sinal com ecos múltiplos.

3.3 Processamento de sinais

Nosso objetivo é detectar a amplitude dos “picos principais”, ou seja, deve-se trabalhar o sinal de forma a extrair o envelope principal do pulso acústico, eliminando o efeito dos picos secundários. Para isso o sinal passa pelo seguinte processamento.

Figura 13: exemplo de eco principal e eco secundário

Seja o seguinte modelo de sinal de ecos múltiplos.

$$x(t) = \sum_1 A_i \Psi(t - t_i) \quad (3.21)$$

Onde $\Psi(t)$ é a forma de onda, ou pulso característico de uma reflexão, conforme indicado na figura seguinte :

Figura 14: forma de onda $\Psi(t)$

A partir disso foi gerado o sinal de correlação :

$$R_{x\Psi}(\tau) = \int x(t)\Psi(t-\tau)dt \quad (3.22)$$

Este sinal evidencia os picos principais, embora picos secundários ainda estejam presentes.

Figura 15: sinal evidenciando os picos principais.

Para filtrar os picos secundários é necessário trabalhar um pouco mais o sinal; ou seja, o que pode ser feito através do sinal analítico associado ao sinal de correlação, isto é:

$$Z_x(t) = R_{x\Psi}(t) + iH[R_{x\Psi}(t)] \quad (3.23)$$

onde $H[R_{x\Psi}(t)]$ é a transformada de Hilbert definida como

$$H[R_{x\Psi}] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{R_{x\Psi}(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (3.24)$$

Feito isso calculamos a amplitude instantânea:

$$A(t) = \text{mod}[Z(t)] = \sqrt{R_{x^*}(t)^2 + [H(R_{x^*}(t))]^2} \quad (3.25)$$

Feito isso o programa transforma os sinais em gráfico sem os ecos secundários e então os picos são detectados

Figura 16: sinal após todo processamento

Para o processamento do sinal foi usado um programa escrito em LabVIEW , que executa as operações citadas acima.A seguir nas figuras 17e 18 são mostrados respectivamente o painel frontal do programa e o diagrama em blocos do mesmo.

Figura 17: painel frontal do programa.

No painel frontal do programa podem ser visualizadas todas as etapas do processamento de sinal, as amplitudes e localizações dos picos principais. No diagrama em blocos cuja figura se encontra abaixo, é explicado todas as ferramentas usadas para o processamento do sinal.

Figura18: diagrama em blocos do programa

CAPÍTULO 4

4-EXPERIMENTOS E RESULTADOS

4.1 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Com o intuito de medir a velocidade do som e a impedância acústica na gasolina variando-se a porcentagem de álcool, óleo diesel, querosene e tolueno, foram realizados alguns testes usando os equipamentos descritos na seção anterior.

Mais precisamente queríamos avaliar num primeiro teste a maneira que a impedância acústica e a velocidade do som na gasolina variavam com o acréscimo de álcool anidro, querosene, óleo diesel e tolueno. Posteriormente queríamos comparar os valores obtidos pela medida direta e pelo programa, uma vez que esse nos fornece resultados imediatos, tendo em vista nosso objetivo que é determinar a presença de contaminantes nos combustíveis derivados de petróleo.

Para estes testes foram usadas amostras de gasolina pura acrescidas de álcool anidro, gasolina pura acrescida de tolueno, gasolina comum acrescida de óleo diesel, gasolina comum acrescida de querosene, gasolina comum acrescida de álcool anidro com suas densidades previamente determinadas com grande precisão (método direto) e também checadas com um densímetro.

Primeiro foi determinada a velocidade do som, como a densidade era conhecida calculava-se a impedância acústica, de acordo com a equação 3.1.

As tabelas abaixo mostram a variação da densidade da gasolina com acréscimo de álcool anidro, óleo diesel, tolueno e querosene.

Tabela 1: densidade das amostras de gasolina pura acrescidas de álcool anidro

Gasolina 1	100ml de gasolina	$\rho=0,7373$ g/ml
Gasolina 2	95ml de gasolina + 5ml de álcool anidro	$\rho=0,7397$ g/ml
Gasolina 3	90ml de gasolina + 10ml de álcool anidro	$\rho=0,7416$ g/ml
Gasolina 4	85ml de gasolina + 15ml de álcool anidro	$\rho=0,7445$ g/ml
Gasolina 5	80ml de gasolina + 20ml de álcool anidro	$\rho=0,7464$ g/ml
Gasolina 6	75ml de gasolina + 25ml de álcool anidro	$\rho=0,7484$ g/ml
Gasolina 7	70ml de gasolina + 30ml de álcool anidro	$\rho=0,7552$ g/ml
Gasolina 8	65ml de gasolina + 35ml de álcool anidro	$\rho=0,7555$ g/ml
Gasolina 9	60ml de gasolina + 40ml de álcool anidro	$\rho=0,7554$ g/ml
Gasolina 10	50ml de gasolina + 50ml de álcool anidro	$\rho=0,7594$ g/ml
Álcool	100ml de álcool	$\rho=0,8185$ g/ml

Tabela 2: densidade das amostras de gasolina comum acrescida de óleo diesel

Gasolina pura	100ml de gasolina	$\rho=0.753$ g/ml
Óleo diesel 1	95ml gasolina + 5ml óleo diesel	$\rho=0.756$ g/ml
Óleo diesel 2	90ml gasolina + 10ml óleo diesel	$\rho=0.7624$ g/ml
Óleo diesel 3	80ml gasolina + 20ml óleo diesel	$\rho=0.7712$ g/ml
Óleo diesel 4	70ml gasolina + 30ml óleo diesel	$\rho=0.7782$ g/ml
Óleo diesel 5	50ml gasolina + 50 ml óleo diesel	$\rho=0.7834$ g/ml
Óleo diesel 6	25ml gasolina + 75ml óleo diesel	$\rho=0.816$ g/ml
Óleo diesel 7	100ml de óleo diesel	$\rho=0.8402$ g/ml

Tabela 3: densidade das amostras de gasolina comum acrescida de querosene

Gasolina	100ml de gasolina	$\rho=0.753$ g/ml
Querosene 1	95ml gasolina + 5ml querosene	$\rho=0.7556$ g/ml
Querosene 2	90ml gasolina + 10ml querosene	$\rho=0.7568$ g/ml
Querosene 3	80ml gasolina + 20ml querosene	$\rho=0.7614$ g/ml
Querosene 4	70ml gasolina + 30ml querosene	$\rho=0.7670$ g/ml
Querosene 5	50ml gasolina + 50 ml querosene	$\rho=0.7768$ g/ml
Querosene 6	25ml gasolina + 75ml querosene	$\rho=0.7890$ g/ml
Querosene 7	100ml querosene	$\rho=0.8402$ g/ml

Tabela 4: densidade das amostras de gasolina comum e álcool anidro

Gasolina	100ml de gasolina	$\rho=0.753$ g/ml
Álcool 1	95ml gasolina + 5ml álcool	$\rho=0.7514$ g/ml
Álcool 2	90ml gasolina + 10ml álcool	$\rho=0.7528$ g/ml
Álcool 3	80ml gasolina + 20ml álcool	$\rho=0.7546$ g/ml
Álcool 4	70ml gasolina + 30ml álcool	$\rho=0.7574$ g/ml
Álcool 5	50ml gasolina + 50 ml álcool	$\rho=0.7684$ g/ml
Álcool 6	25ml gasolina + 75ml álcool	$\rho=0.7726$ g/ml
Álcool 7	100ml álcool anidro	$\rho=0.7822$ g/ml

Tabela 5: densidade das amostras de gasolina pura acrescida de tolueno

Gasolina	100ml de gasolina	$\rho=0.7429$ g/ml
Tolueno 1	95ml gasolina + 5ml álcool	$\rho=0.7478$ g/ml
Tolueno 2	90ml gasolina + 10ml álcool	$\rho=0.7584$ g/ml
Tolueno 3	80ml gasolina + 20ml álcool	$\rho=0.7684$ g/ml
Tolueno 4	70ml gasolina + 30ml álcool	$\rho=0.7784$ g/ml
Tolueno 5	50ml gasolina + 50 ml álcool	$\rho=0.7820$ g/ml
Tolueno 6	25ml gasolina + 75ml álcool	$\rho=0.8308$ g/ml
Tolueno 7	100ml tolueno	$\rho=0.8625$ g/ml

Cada amostra foi depositada no recipiente descrito na seção anterior. O transdutor envia a onda acústica, esta atravessa a base do recipiente e quando chega na interface com a amostra uma parte é transmitida e a outra é refletida, por sua vez a parte transmitida percorre a amostra até chegar na interface da amostra com o ar onde consideramos que ocorre reflexão total pelo fato da impedância acústica do ar ser muito menor que a da amostra. Portanto a velocidade do som na amostra é calculada pelo tempo que o som leva para percorrer a distância da base do recipiente até a altura da amostra, ou seja:

$$C_a = \frac{2L_2}{T_2 - T_1} \quad (4.1)$$

L_2 =distância da base do recipiente até a altura da amostra dentro do recipiente.

T_1 =tempo que o som leva para atravessar a base do recipiente

T_2 =tempo que o som leva para percorrer da base do recipiente até a interface da amostra com o ar.

Tanto T_1 como T_2 são facilmente determinados pelo osciloscópio .Para determinar L_2 usou-se um paquímetro .

Determinada a velocidade da amostra determina-se a impedância acústica uma vez que a sua densidade foi previamente calculada.

Figura 19: recipiente usado no experimento

4.2 Erro na velocidade

Com a intenção de quantificar o erro no experimento usamos as seguintes funções.

Seja c a velocidade do som, uma função dependente de 3 variáveis: L_2 , T_1 , T_2 , dada por (4.1), portanto o erro na velocidade pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\Delta c = \left| \frac{\partial c}{\partial L_2} \Delta L_2 \right| + \left| \frac{\partial c}{\partial T_1} \Delta T_1 \right| + \left| \frac{\partial c}{\partial T_2} \Delta T_2 \right| \quad C_a = \frac{2L_2}{T_2 - T_1} \quad (4.2)$$

$$\Delta c = \frac{2}{T_2 - T_1} \Delta L_2 + \frac{2L_2}{(T_2 - T_1)^2} \Delta T_1 + \frac{2L_2}{(T_2 - T_1)^2} \Delta T_2 \quad (4.3)$$

$$\Delta L_2 = 1 \text{ mm}$$

$$\Delta T_1 = \Delta T_2 = 10^{-6} \text{ s}$$

Feito estes cálculos encontramos os seguintes valores para a velocidade do som:

Tabela 6: velocidade do som na gasolina pura com álcool anidro

AMOSTRA	c	Δc
GASOLINA 1	1367m/s	150m/s
GASOLINA 2	1195m/s	115m/s
GASOLINA 3	1370m/s	13 m/s
GASOLINA 4	1368m/s	153m/s
GASOLINA 5	1271m/s	129m/s
GASOLINA 6	1269m/s	128m/s
GASOLINA 7	1379m/s	104m/s
GASOLINA 8	1450m/s	144m/s
GASOLINA 9	1442m/s	160m/s
GASOLINA 10	1334m/s	143m/s
ALCOOL	1315m/s	96m/s

Figura 20: variação da velocidade do som com acréscimo de álcool anidro na gasolina pura.

Tabela 7: velocidade do som na gasolina comum com óleo diesel

AMOSTRA	c	Δc
Gasolina	1381m/s	65m/s
Óleo diesel 1	1140m/s	64m/s
Óleo diesel 2	1148m/s	64m/s
Óleo diesel 3	1228m/s	68m/s
Óleo diesel 4	1121m/s	76m/s
Óleo diesel 5	1230m/s	74m/s
Óleo diesel 6	1360 m/s	85m/s
Óleo diesel 7	1409m/s	66m/s

Figura 21: variação na velocidade do som ao acrescentar óleo diesel na gasolina comum

Tabela 8: velocidade do som na gasolina comum com acréscimo de querosene

AMOSTRA	c	Δc
Gasolina	1381m/s	65m/s
Querosene 1	1299m/s	64m/s
Querosene 2	1312m/s	67m/s
Querosene 3	1314m/s	66m/s
Querosene 4	1316m/s	68m/s
Querosene 5	1400m/s	71, m/s
Querosene 6	1398m/s	75m/s
Querosene 7	1396m/s	69m/s

Figura 22: variação da velocidade do som na gasolina comum com acréscimo de querosene

Tabela 9: velocidade do som na gasolina comum com acréscimo de álcool anidro

AMOSTRA	c	Δc
Gasolina	1381m/s	65m/s
Álcool 1	1299m/s	72m/s
Álcool 2	1204m/s	61m/s
Álcool 3	1246m/s	63m/s
Álcool 4	123 m/s	60m/s
Álcool 5	1243m/s	61m/s
Álcool 6	1211m/s	59m/s
Álcool 7	1252m/s	71m/s

Figura23: variação na velocidade do som da gasolina comum com acréscimo de álcool anidro

Tabela 10: velocidade do som na gasolina pura com acréscimo de tolueno

AMOSTRA	c	Δc
Gasolina	1405m/s	127m/s
Tolueno 1	1379m/s	75m/s
Tolueno 2	1467m/s	90m/s
Tolueno 3	1400m/s	76m/s
Tolueno 4	1508m/s	82m/s
Tolueno 5	1490m/s	83m/s
Tolueno 6	1538m/s	87m/s
Tolueno 7	1574m/s	99m/s

Figura 24: variação da velocidade do som na gasolina pura com acréscimo de tolueno

4.3 Erro na impedância acústica :

Seja Z a impedância acústica, uma função dependente de duas variáveis c , ρ , dada por (3.1), assim o erro no cálculo da impedância acústica pode ser dada pelas seguintes equações.

$$\Delta z = \frac{\partial z}{\partial c} \cdot \Delta c + \frac{\partial z}{\partial \rho} \cdot \Delta \rho \quad (4.4)$$

$$\Delta c = \rho \cdot \Delta c + c \cdot \Delta \rho \quad (4.5)$$

Efetuada os cálculos encontramos os seguintes valores para a impedância acústica:

Tabela 11: impedância acústica na gasolina pura com acréscimo de álcool anidro

Amostra	Z	ΔZ
Gasolina 1	1008gm/ml.s	114g.m/ml.s
Gasolina 2	884gm/ml.s	88g.m/ml.s
Gasolina 3	1016gm/ml.s	104g.m/ml.s
Gasolina 4	1018g.m/ml.s	117g.m/ml.s
Gasolina 5	948g.m/ml.s	99g.m/ml.s
Gasolina 6	950g.m/ml.s	99g.m/ml.s
Gasolina 7	1041g.m/ml.s	81g.m/ml.s
Gasolina 8	1095g.m/ml.s	113g.m/ml.s
Gasolina 9	1089g.m/ml.s	124g.m/ml.s
Gasolina 10	1013g.m/ml.s	112g.m/ml.s
Álcool	1076g.m/ml.s	82g.m/ml.s

Figura 25: variação da impedância acústica com o acréscimo de álcool anidro na gasolina pura.

Tabela 12: impedância acústica da gasolina comum com acréscimo de óleo diesel

AMOSTRA	z	ΔZ
Gasolina	1040g.m/ml.s	74g.m/ml.s
Óleo diesel 1	962g.m/ml.s	88g.m/ml.s
Óleo diesel 2	975g.m/ml.s	90g.m/ml.s
Óleo diesel 3	947g.m/ml.s	94g.m/ml.s
Óleo diesel 4	972g.m/ml.s	99g.m/ml.s
Óleo diesel 5	963g.m/ml.s	102g.m/ml.s
Óleo diesel 6	1110g.m/ml.s	118g.m/ml.s
Óleo diesel 7	1184g.m/ml.s	106g.m/ml.s

Figura 26: variação da impedância acústica na gasolina comum com acréscimo de óleo diesel.

Tabela 13: impedância acústica na gasolina comum com acréscimo de querosene

AMOSTRA	z	ΔZ
Gasolina	1040gm/ml.s	74g.m/ml.s
Querosene 1	110gm/ml.s	74g.m/ml.s
Querosene 2	993gm/ml.s	74g.m/ml.s
Querosene 3	1000g.m/ml.s	74g.m/ml.s
Querosene 4	1009g.m/ml.s	76g.m/ml.s
Querosene 5	1087g.m/ml.s	80g.m/ml.s
Querosene 6	1103g.m/ml.s	84g.m/ml.s
Querosene 7	1090g.m/ml.s	81g.m/ml.s

Figura 27: impedância acústica na gasolina comum com querosene

Tabela 14: impedância acústica na gasolina comum com acréscimo de álcool anidro

AMOSTRA	z	ΔZ
Gasolina	1040g.m/ml.s	62g.m/ml.s
Álcool 1	976g.m/ml.s	67g.m/ml.s
Álcool 2	906g.m/ml.s	57g.m/ml.s
Álcool 3	940g.m/ml.s	59g.m/ml.s
Álcool 4	932g.m/ml.s	57g.m/ml.s
Álcool 5	950g.m/ml.s	58g.m/ml.s
Álcool 6	935g.m/ml.s	57g.m/ml.s
Álcool 7	979g.m/ml.s	67g.m/ml.s

Figura 28: variação da impedância acústica na gasolina comum com acréscimo de álcool anidro

Tabela 15: impedância acústica na gasolina pura com acréscimo de tolueno

AMOSTRA	z	ΔZ
Gasolina	1008 g.m/ml.s	152 g.m/ml.s
Tolueno 1	1031 g.m/ml.s	112 g.m/ml.s
Tolueno 2	1112 g.m/ml.s	128 g.m/ml.s
Tolueno 3	1076 g.m/ml.s	116 g.m/ml.s
Tolueno 4	1174 g.m/ml.s	126 g.m/ml.s
Tolueno 5	1165 g.m/ml.s	125 g.m/ml.s
Tolueno 6	1278 g.m/ml.s	135 g.m/ml.s
Tolueno 7	1357 g.m/ml.s	150 g.m/ml.s

Figura 29: variação da impedância acústica na gasolina pura com acréscimo de tolueno

A densidade de cada amostra foi calculada previamente pelo método tradicional (massa/volume) e checada com um densímetro e obtivemos o seguinte gráfico:

Figura30: variação da densidade com o acréscimo de álcool anidro na gasolina pura

Figura 31: variação da densidade com acréscimo de óleo diesel na gasolina comum

Figura 32: variação da densidade da gasolina comum acréscimo de querosene

Figura 33: variação da densidade da gasolina comum com o aumento de álcool anidro

Figura 34: variação da densidade da gasolina pura com o aumento de tolueno

De acordo com os resultados obtidos a densidade, a impedância acústica e a velocidade do som não variam linearmente na gasolina com o aumento de álcool anidro, óleo diesel, tolueno, embora a densidade varie de forma uniforme não dificultando a interpretação dos resultados. O mesmo não ocorre com a impedância acústica e velocidade do som.

Os resultados até aqui foram obtidos em laboratório e de maneira direta, ou seja, a densidade foi medida pelo método tradicional, massa sobre volume, a velocidade do som medida pelo tempo que o som leva para percorrer um caminho conhecido e a impedância acústica através da equação 3.1. Os valores encontrados

são muito próximos dos valores tabelados, a partir de agora vamos apresentar resultados obtidos de forma indireta, ou seja, usando o programa descrito na sessão anterior, onde o sinal acústico passa pelo processamento explicado no capítulo anterior com objetivo de calcular o coeficiente de reflexão R instantaneamente, pois é através deste que encontramos a impedância acústica Z .

Comparando o coeficiente de reflexão encontrado pelo programa e o coeficiente de reflexão encontrado pelo método direto encontramos os gráficos abaixo:

Figura 35: gráfico comparando os coeficientes de reflexão na gasolina pura com acréscimo de álcool anidro.

Figura 36: gráfico comparando os coeficientes de reflexão na gasolina comum com acréscimo de óleo diesel.

Figura 37: gráfico comparando os coeficientes de reflexão na gasolina comum com acréscimo de querosene.

O coeficiente de reflexão real foi calculado através da seguinte equação

$$R_p = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_a - Z_b}{Z_a + Z_b}$$

Onde seus erros foram encontrados a partir desta equação

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial Z_a} \Delta Z_a + \frac{\partial R}{\partial Z_b} \Delta Z_b$$

$$\Delta R = \left| \frac{2Z_b}{(Z_a + Z_b)^2} \Delta Z_a \right| + \left| \frac{2Z_a}{(Z_a + Z_b)^2} \Delta Z_b \right|$$

Como a onda acústica atravessa do recipiente de aço inox entende-se que $Z_a = 46000 \text{ g.m/ml.s}$ é a impedância acústica do aço inox, Z_b é a impedância da amostra a ser analisada. O erro da impedância do aço inox foi calculado usando a equação (4.5).

Encontramos $\Delta Z_a = 2861,9076$, enquanto ΔZ_b , o erro da amostra foi calculado como citado acima.

O coeficiente de reflexão R do ultra-som foi calculado através da seguinte equação:

$$R = \frac{1}{\alpha} \exp \left(\frac{\sum_{n=1}^N n \ln A(t_n)}{\sum_{n=1}^N n^2} \right) \quad (4.6)$$

A equação (4.6), foi obtida da seguinte maneira :

Seja:

$$A_n = (\alpha R)^n$$

Onde α quantifica o decaimento intrínseco, A a amplitude e N o número de picos detectados. Aplicando logaritmo ficamos com:

$$\ln A_n = n \ln(\alpha R) \text{ , ou seja, uma reta } y=ax \text{ onde;}$$

$$y = \ln A_n$$

$$a = \ln(\alpha R)$$

$$x = n$$

$$b = 0$$

Fazendo a regressão linear para o caso particular $y=ax$ e $b=0$ ficamos com

$$\ln(\alpha R) = \frac{\sum n \ln A_n}{\sum n^2}$$

A partir daí encontramos o R pela equação (4.6)

Este R foi encontrado para diminuir erros experimentais.

Para calcular erro de R do ultra-som foi usada a seguinte equação:

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha + \frac{\partial R}{\partial a} \cdot \Delta a \quad (4.7)$$

$$\Delta R = \left| \frac{1}{\alpha} \exp a \Delta \alpha \right| + \left| \frac{1}{\alpha} \exp a \Delta a \right| \quad (4.8)$$

Onde $a = \ln \alpha R$ e $\Delta \alpha = 0$, uma vez que $\alpha = 0,7370$ é uma constante.

A partir do R encontrado pelo programa calculamos a impedância, usando a seguinte equação:

$$Z_r = Z_i \left(\frac{1-R}{1+R} \right) \quad (4.9)$$

Onde $Z_r = Z$ da amostra

$Z_i = Z$ do aço inox

R=coeficiente de reflexão encontrado pelo programa

Figura38: compara impedância acústica real e ultra-som na gasolina pura com acréscimo de álcool anidro.

Figura39: compara impedância acústica real e ultra-som na gasolina com acréscimo de óleo diesel.

Figura 40: compara impedância acústica real e ultra-som na gasolina com acréscimo de querosene.

Para calcular o erro de Z encontrado pelo programa usamos a seguinte equação:

$$\Delta Z_f = \frac{\partial Z_f}{\partial Z_i} \Delta Z_i + \frac{\partial Z_f}{\partial R} \Delta R$$

$$\Delta Z_f = \left| \left(\frac{1-R}{1+R} \right) \Delta Z_i \right| + \left| \frac{2Z_i}{(1+R)^2} \Delta R \right|$$

Onde $Z_f = Z$ da amostra

$Z_i = Z$ do aço inox

R = coeficiente de reflexão encontrado pelo programa

$\Delta Z_i = 2860,9076 \text{ g.m/ml.s}$, erro na medida da impedância acústica do aço inox.

ΔR = erro encontrado no coeficiente de reflexão do programa

Os resultados encontrados pelo método direto estão muito próximos dos valores tabelados e observando os gráficos que comparam os coeficientes de

reflexão e impedâncias acústicas e seus respectivos erros do método direto e do ultra-som, é perceptível a eficiência do método proposto.

Nosso método mede a densidade de forma não intrusiva, através de uma parede de 1,3cm de inox, e mesmo assim obtém resultados comparáveis ao método direto.

O experimento foi realizado a uma temperatura de 21° C. Sabe-se que a temperatura influencia na velocidade do som, mas não de forma linear. Testes realizados com petróleo variando a temperatura de 15°C a 65°C evidenciam isto.

Figura 41: variação da velocidade do som variando a temperatura

Devido à falta de linearidade na variação da velocidade do som, com aumento da temperatura supôs-se que haveria perda de algumas substancia do petróleo. Para analisar se houve alguma perda foi realizada uma análise térmica diferencial (DTA) e uma análise termogravimétrica (TGA) em uma amostra do petróleo, onde foi verificado que não houve nenhuma perda de qualquer componente do petróleo antes que atinja 85°C, portanto a velocidade do som varia com a temperatura por alguma propriedade mecânica e não por perda de massa.

A densidade do petróleo foi previamente determinada $\rho=0,9376\text{g/ml}$ e com não foi constatada perda de massa ou volume variando-se a temperatura até 65°C a impedância acústica do petróleo temos:

Figura 42: variação da impedância acústica variando a temperatura

CAPITULO 5

5 CONCLUSÕES

A variação das propriedades acústicas (impedância acústica e velocidade do som), na gasolina com acréscimo de outras substancias é evidente, embora essa variação não seja linear nem uniforme o que dificulta a interpretação dos resultados. É óbvio que a partir apenas das propriedades acústicas nada pode ser diagnosticado, mas podemos usa-las para determinar a densidade e com base na densidade diagnosticar a qualidade dos combustíveis derivados de petróleo.

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que os valores encontrados pelo método direto e os valores encontrados pela metodologia proposta são praticamente idênticos.

A impedância acústica pode ser calculada instantaneamente e com grande precisão justificando assim o uso da metodologia proposta.

É evidente que a partir apenas da impedância acústica nada pode ser concluído, mas o desenvolvimento de um sensor para o cálculo da velocidade do som permitiria o cálculo da densidade e assim seria possível diagnosticar a qualidade dos combustíveis.