Eduardo Mariano Veloso

Avaliação de um sensor piezoelétrico para medição de viscosidade e densidade de fluidos.

Orientador

Igor Braga de Paula

Projeto final apresentado ao curso de Engenharia Mecânica

da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro,

com objetivo final de adquirir o diploma

de graduação do curso de Engenharia Mecânica

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade de cursar uma universidade com dimensão quem tem a PUC-RJ. Agradeço a meu orientador, Igor Braga por ter aceitado me auxiliar na elaboração deste projeto. Sua tutoria foi fundamental para a realização deste trabalho.

Agradeço a minha família, que sempre me apoiou em todas as minhas iniciativas e acreditou no meu potencial, desde a carreira no futebol ao início da vida acadêmica. Minha mãe, meu pai e meus irmãos tiveram um papel fundamental na concretização deste momento tão importante para mim e, sinceramente, não acredito que palavras seriam suficientes para demonstrar a minha gratidão. Obrigado por cada esforço que tiveram para que esse sonho pudesse ser concretizado.

Dedico à minha namorada, Julia, por nunca faltar com apoio e motivação para que eu seja não só uma pessoa melhor, mas um profissional mais capacitado. Em alguns momentos tive que abrir mão de estar com ela para que pudesse me dedicar aos estudos e ela sempre compreendeu a necessidade desse tipo de atitude. Não tenho como ser mais grato pela sorte que tenho de tê-la ao meu lado, obrigado por tudo meu amor.

Dedico ao meu primo, Rodrigo, na verdade, ao irmão que é para mim. Sempre esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida, seja nos momentos mais alegres e nos mais tristes. Obrigado por tudo.

Devo um enorme agradecimento aos amigos da PUC que me ajudaram, estudaram comigo, deram dicas sobre matérias e vivenciaram as dificuldades ao longo faculdade comigo, obrigado pelas risadas e por fazer a faculdade um ambiente mais feliz, vocês continuarão presentes em minha vida, sem dúvida. Aos amigos mais antigos, agradeço

também pelo incentivo na decisão da minha carreira, agradeço pela resenha, pelas canetas no futebol e por serem grandes companheiros nessa jornada.

Resumo

A viscosidade é uma das propriedades mais importantes dos fluidos, principalmente dos óleos lubrificantes. A capacidade de carga que pode ser suportada em um mancal depende, dentre outros parâmetros, da viscosidade dos lubrificantes. A viscosidade afeta diretamente a eficiência e o calor gerado por atrito nos componentes mecânicos, influindo na vedação entre as folgas das peças e no próprio consumo dos motores. Normalmente, os lubrificantes sofrem degradação com o tempo de operação e precisam ser substituídos periodicamente. A determinação do momento de troca é essencial para garantir que o motor não sofra dano ou perda de eficiência. No presente trabalho, buscou-se desenvolver um equipamento que pudesse ser aplicado no monitoramento das propriedades dos óleos lubrificantes, afim de, em tempo real, indicar se o lubrificante deve ou não ser trocado. O equipamento proposto utiliza discos piezoelétricos, de baixo custo, para medição de viscosidade e densidade de fluidos. O objetivo deste trabalho foi de avaliar a resposta do dispositivo a variações das propriedades dos fluidos. Para isso, excitou-se o sensor com uma perturbação em degrau e mediu-se a resposta do equipamento imerso em fluidos com diferentes densidades e viscosidades. Uma mistura de glicerol e água destilada com concentração de 90% e 10%, respectivamente, foi utilizada em diferentes temperaturas para avaliar a sensibilidade do sensor à variações de viscosidade. Foi analisada, também, a sensibilidade do sensor a variações de densidade. Para isso foram utilizadas diferentes misturas que resultaram em fluidos com viscosidade semelhantes e densidades diferentes. Os resultados se mostraram promissores, indicando que, de fato, é possível desenvolver um equipamento de baixo custo para medição dessas duas propriedades modo simultâneo e consequente monitoramento da degradação de lubrificantes.

Palavra-chave: Viscosidade, densidade, efeito piezoelétrico.

Abstract

Viscosity is one of the most important properties of fluids, especially for lubricating oils. The load capacity that can be supported in a bearing strongly depends on the viscosity of the lubricants, which form an oil film between the moving parts. Viscosity directly affects the efficiency and heat generated in the mechanical components, influencing the sealing effect between the gaps of the parts and the actual consumption of the engine. Thus, there was an interest in monitoring the properties of a lubricating oil in order to indicate whether the lubricant should be changed, in real time.

In this present project, the objective is to evaluate the possibility of using piezoelectric discs, of low cost, for measurement of viscosity and density of fluids. For this, a sensor was constructed and the response of the equipment to the controlled disturbances was evaluated when the respective one is immersed in fluids of known viscosity and density. A mixture of glycerol and distilled water at 90% and 10% concentration, respectively, was used at different temperatures to evaluate the sensitivity of the sensor to variations in viscosity. The sensitivity of the sensor to density variations was also analyzed. For this purpose, similar viscosity fluids and different densities were used. The results were promising, indicating that, in fact, it is possible to develop a low cost equipment to measure these two properties simultaneously.

Key words: Viscosity, density, piezoelectric effect.

Sumário

1. Introdução 12

2. Revisão literária sobre óleos lubrificantes e aplicações 14

2.1 Óleo lubrificante 14

2.2 Propriedades dos óleos lubrificantes 18

1. 2.2.1 Cor: 20
2. 2.2.2Viscosidade: 20
3. 2.2.2.1 Viscosidade dinâmica 20
4. 2.2.2.2 Viscosidade cinemática 22
5. 2.2.3 Relação entre viscosidade e temperatura 22
6. 2.2.3.1 Constante de viscosidade-temperatura (CVT) 22
7. 2.2.3.2 ASTM (ASTM D341) 23
8. 2.2.3.3 Índice de viscosidade (IV) 23

2.2.4 Densidade 25

2.2.5 Ponto de fulgor 26

2.2.6 Ponto de Fluidez 27

2.3 Classificação dos lubrificantes 27

2.3.1 Classificação API 28

2.3.2 Classificação SAE 31

2.4 Medidores de viscosidade para óleo 33

3. Sensor proposto 35

3.1 Efeito piezoelétrico 35

3.2 Funcionamento do sensor 45

4. Metodologia 47

4.1 Aquisição de dados 51

5. Resultados 55

6. Conclusão 64

7. Referencias 66

8. ANEXOS 69

Lista de Imagens

Figura 1- Representação esquemática do escoamento de Couette_____21

Figura 2- Representação do indicador de viscosidade_____24

Figura 3- Representação esquemática da conversão de energia no efeito piezoelétrico_____34

Figura 4- Estrutura atômica do quartzo no estado normal (a), em compressão (b) e tração (c), respectivamente_____35

Figura 5- Estrutura atômica do PZT: a) Tetragonal distorcido; b) Cúbico_____36

Figura 6 - a) PZT sem polarização; b) Campo elétrico aplicado; c) Resultado da polarização___37

Figura 7- a) Imagem real do buzzer piezoelétrico utilizado no projeto; b) Desenho esquemático de um buzzer_____38

Figura 8 - a) Diafragma expandido; b) Diafragma contraído; c) Estrutura da vibração com repetição do cliclo_____39

Figura 9- a) Circuito equivalente ao piezoelétrico; b) Equivalencia mecânica_____39

Figura 10 - Viscosímetro rotacional da Viscotech à esquerda e banho da Ethiktechnology à direita

Figura 11 - Variação da viscosidade com a temperatura_____44

Figura 12- Montagem dos dois transdutores piezoelétrico, unidos por uma camada de cola epóxi_____46

Figura 13 - Montagem final dos transdutores ao corpo de latão_____46

Figura 14 - Ilustração da medição da viscosidade através dos transdutores piezoelétrico_____47

Figura 15 - Béquer em banho para controle de temperatura da glicerina_____47

Figura 16 - Vibração do conjunto a) em expansão; b) em contração_____

Figura 17 - Sistema para aquisição de dados_____49

Figura 18 - Placa de aquisição de dados NI USB-6009_____50

Figura 19 - Bancada de testes_____51

Figura 20 – Bancada de testes_____51

Figura 21- Decaimento do sinal para diferentes viscosidades assim como o envelopamento dessas curvas_____54

Figura 22 - Decaimento da amplitude para diferentes viscosidades_____55

Figura 23 - Espelhamento do sinal_____56

Figura 24 - Efeito causado pelo espelhamento do sinal_____57

Figura 25 – Relação entre viscosidade e frequências de vibração_____58

Figura 26- Variação da freq. natural modificada com o fator de amortecimento_____58

Figura 27 – Relação entre coeficiente de amortecimento e a frequência natural com a viscosidade 59

Figura 28 - Relação entre coeficiente de amortecimento e a frequência natural com a viscosidade 60

Figura 29 - Variação do fator de amortecimento com a viscosidade 60

Figura 30 - Relação entre coeficiente de amortecimento e a frequência natural com a densidade 62

Lista de símbolos

F →força horizontal aplicada na placa superior

A →área da camada de fluido

u →gradiente de velocidade

h →altura da camada de fluido

μ →viscosidade dinâmica do fluido

τ →tensão cisalhante

υ →viscosidade cinemática do fluido

ρ →densidade do fluido

M →coeficiente linear de reta relacionada a viscosidade e a temperatura

T →temperatura em Kelvin

U →viscosidade a 100ºF

L →viscosidade a 100 ºF de um óleo de 0 IV

H →viscosidade a 100 ºF de um óleo 100 IV

Y →viscosidade cinemática a 100ºC

m →massa do material

r →coeficiente de atrito

Cm →elasticidade do material

L1→indutância

C1→Capacitância

R1 →resistência ressonante

F →frequência de ressonância

ρ_L →densidade do líquido

η →viscosidade do líquido

A →área da superfície

ω_n →frequência natural de vibração

ξ →fator de amortecimento

Lista de Tabelas

Tabela 1 _____ 16

Tabela 2 _____ 18

Tabela 3 _____ 33

Tabela 4 _____ 44

Tabela 5 _____ 45

1. Introdução

A necessidade de lubrificação se explica quando duas superfícies metálicas deslizam uma em relação à outra. A este movimento existe uma resistência, chamada de atrito. O atrito implica em geração de calor e desgaste das peças, além de perda de energia pelo agarramento entre os componentes, causando uma perda de rendimento mecânico. Afim de minimizar os efeitos inerentes ao atrito, são utilizados diversos tipos de óleos lubrificantes.

Além de diminuir o atrito entre superfícies metálicas, os óleos lubrificantes também contribuem para a refrigeração dos motores; além disso os óleos protegem contra corrosão e desgaste, que podem resultar na remoção de metais do motor e ainda ajuda na vedação, impedindo a saída de lubrificante e a entrada de contaminantes ao compartimento interno dos motores. Outra função dos lubrificantes é retirar as partículas resultantes do processo de combustão e manter estas partículas em suspensão no óleo, evitando assim que se depositem no fundo do cárter e provoquem incrustações.

Qualquer óleo lubrificante pode sofrer com contaminações e degradações repentinas muito antes do prazo de vencimento estabelecido pelos fabricantes, o que leva a perda das principais funções desses fluidos. É necessário o monitoramento das principais características, afim de garantir a aplicabilidade e função dos mesmos, garantindo assim que os equipamentos não sofram desgastes excessivos e quebras prematuras.

No presente trabalho, buscou-se avaliar a possibilidade de uso de sensores de baixo custo para a medição da densidade e viscosidade de fluidos. O objetivo é contribuir para o desenvolvimento de um equipamento que possa ser utilizado para monitoramento da

degradação de óleos lubrificantes. Neste trabalho utilizou-se um sensor composto por dois discos piezoelétricos colados.

O trabalho está organizado da seguinte maneira: revisão da literatura, metodologia, resultados e conclusões.

2. Revisão literária sobre óleos lubrificantes e aplicações

Visando demonstrar a necessidade do monitoramento dos óleos lubrificantes, para manutenção e otimização de equipamentos; foi feita uma revisão da literatura afim de demonstrar a relevância dos lubrificantes para a vida útil e eficiência de equipamentos mecânicos, assim como as mudanças decorrentes da degradação.

2.1 Óleo lubrificante

A análise das propriedades dos óleos lubrificantes são importantes para que se aumente a vida útil dos equipamentos mecânicos. Segundo Godfrey [1] de setenta a oitenta e cinco por cento das deficiências e problemas de desgaste em máquinas lubrificadas são causadas por contaminação do óleo lubrificante. O monitoramento das propriedades dos fluidos fornecem informações precisas e importantes acerca do estado de conservação que o óleo lubrificante se encontra.

A deterioração e a contaminação são as principais causas em prejuízos à eficiência do óleo lubrificante. Snook [2] propôs uma série de experimentos com óleos usados em motores. Naquele trabalho analisou-se as principais causas de contaminação e degradação dos lubrificantes e concluiu que o monitoramento de amostras de óleos, além de mostrar se o fluido está em condições de continuar em serviço, pode revelar também problemas de ambiente e de operação. Snook[2] relaciona os ensaios das amostras de lubrificantes com os prováveis defeitos dos motores de combustão interna e seus pontos de origem. As conclusões de Snook[2] estão resumidas na tabela 1.

Para determinar a degradação do óleo lubrificante devem ser analisados parâmetros como: aparência (fuligem), viscosidade, índice de basicidade total (TBN), índice de acidez

(TAN), oxidação (infravermelho), composição e aditivos, ponto de fulgor, densidade relativa e corrosão em lâmina de cobre.

Tabela 1. Possíveis causas de contaminação de óleos de motores

Contaminação por água	1. Condensação: operações a baixa temperatura, ventilação inadequada do cárter, uso excessivo em marcha lenta, períodos curtos em serviços interminantes; 2. Elevado vazamento de gases: Anéis ou camisas gastas, restrições no sistema de escape; 3. Vazamento de refigerante: juntas do cabeçote vazando, cabeçote apertado com torque indevido, bloco ou cabeçote rachado;
Redução da viscosidade	1. Uso de produto menos viscoso; 2. Diluição pelo combustível, bicos injetores gotejando, alimentação de ou sistema de escape obstuido;
Aumento da viscosidade	1. Uso de produto mais viscoso; 2. Contaminação por água e por fuligem do combustível 3. Degradação: refrigeração inadequada, operação com mistura pobre, período de drenagem excessivamente
Contaminação por insolúveis	1. Fuligem do combustível: operação com mistura rica, bicos injetores defeituosos, entrada de ar de admissão obstruída; 2. Entrada de poeira: manutenção inadequada do filtro de ar, vazamento de ar no sistema de admissão; 3. Desgaste metálico: geralmente relacionado com quantidade de impurezas aspirqadas, manutenção inadequada do filtro de

Fonte: Snook (1998)

Snowden e Westerheid [3], estudaram a eficiência dos óleos lubrificantes e eficiência das análises de lubrificantes na manutenção de aparatos mecânicos. Eles propuseram um procedimento de análise, onde o desgaste metálico, o acumulo de impurezas e a composição de borras de óleo foram analisados e então, determinados limites máximos de concentração de contaminantes em redutores de engrenagens, por exemplo. Naquele

trabalho, concluiu-se que, que a análise dos óleos lubrificantes é uma excelente ferramenta de manutenção preventiva.

Steenberger [4] observou as análises de óleo lubrificante como forma de manutenção preventiva. As amostras de óleo lubrificante de equipamentos mecânicos foram amostradas periodicamente e analisadas. O autor concluiu que a simplicidade de um programa conjunto entre laboratório de análises e manutenção de equipamentos, que permita a comunicação rápida e eficaz entre os departamentos é extremamente importante para reduzir problemas de falha em equipamentos. Segundo Desquibes [5], as análises de óleos lubrificantes unidas a um apropriado diagnóstico são uma excelente ferramenta para auxiliar na manutenção.

Com o intuito de otimizar a utilização dos lubrificantes, Gasparini [6] vislumbrou a necessidade de controlar os fatores que afetam os óleos para a partir daí analisar as características dos lubrificantes deteriorados. Os resultados foram comparados com as análises de óleos novos e correlacionados com as causas mecânicas de contaminação para todos os equipamentos industriais. Os resultados estão resumidos na tabela 2. Conclui-se então que a análise sistemática do óleo usado tem grande relevância entre os métodos de manutenção, sendo considerada como um dos melhores sistemas auxiliares para acompanhamento e controle do funcionamento de equipamentos mecânicos. Essas conclusões corroboram com as observações de Erikson et.al [7].

Tabela 2. Fontes típicas de contaminção de elementos químicos

Elemento	Fontes típicas
Alumínio	Mancais, pistões e poeiras
Atimônico	Mancais
Cromo	Cilindro, anéis, refrigerante, virabrequim e engrenagens
Cobre	Mancais, buchas e peças de bronze
Ferro	Cilindros, camisas, ferrugem e virabrequim
Chumbo	Mancais, gasolina, graxas e tinta
Níquel	Eixos, anéis e válvulas
Silício	Poeira e antiespumantes
Estanho	Solda e mancais
Titânio	Molas, válvulas e componentes de turbinas
Zinco	Aditivo, mancais e chapas galvanizadas

Fonte: Gasparini (1983b)

Nepomuceno [8] destacou a relevância da observação e da análise do óleo lubrificante deteriorado em um plano de manutenção preventiva, visando o monitoramento do aparato mecânico e economia do fluido de lubrificação, evitando a substituição do óleo lubrificante a cada período de operação e passando a efetuar a troca só quando necessário. Foram realizados diversos ensaios físico-químicos, tais como, a medida da viscosidade cinemática, determinação de água no óleo e a análise metalográfica. Nepomuceno [8] salientou as limitações do processo devido ao elevado custo associado às análises dos fluidos.

Segundo Stauffer e Thompson [9], alguns testes de oxidação dos lubrificantes em bancada são justificáveis devido ao alto custo dos testes de campo e ao longo tempo para a obtenção de resultados. Os testes propostos por Stauffer e Thompson [9] buscavam reproduzir as condições de operação de motores de combustão interna, visando uma resposta rápida nos testes de oxidação. O objetivo dos testes era avaliar a estabilidade à oxidação de diferentes óleos lubrificantes. Segundo os autores, a vida útil do lubrificante está densamente

ligada com a sua capacidade de controle do aumento da viscosidade, retenção da alcalinidade e prevenção na formação de insolúveis.

Borin [10] propôs metodologias quantitativas para determinação de contaminantes e estabeleceu parâmetros de qualidade de óleos lubrificantes automotivos, tais como a viscosidade e o número de base total (TBN), Borin[10] comparou o parâmetro da viscosidade do lubrificante a 100ºC (cSt), com amostras de óleo lubrificante coletados de motores de ônibus e utilizou a diferença em relação ao padrão como critério para determinar o descarte dos fluidos.

De acordo com [11] se um lubrificante usado tiver sua viscosidade aumentada em relação ao seu valor original em 15%, ou diminuir sua viscosidade em 20% deverá ser trocado de imediato. Portanto, independentemente do tipo de contaminação, é possível analisar se, através da viscosidade, o óleo lubrificante está ou não propício para serviço.

O aumento ou diminuição da viscosidade pode ser prejudicial ao motor ou às outras partes, pois interferem diretamente no fluxo e na capacidade de manter a película lubrificante nas parte móveis.

Existem testes de laboratório que são capazes de determinar a origem da contaminação afim de combate-la; porém somente a análise da viscosidade já é determinante para troca ou não do óleo usado.

2.2 Propriedades dos óleos lubrificantes

A elaboração dos óleos lubrificantes faz-se através da mistura adequada de diferentes óleos básicos acabados obtidos após os processos de refinação. Estas misturas, feitas em proporções exatas para obtenção de propriedades determinadas, são completadas

com outros tratamentos e/ou aditivos, a fim de dotar o produto final com características especiais, que permitirão aos óleos satisfazerem todas as exigências nos casos para que são recomendados. [11]

Para se chegar as características almejadas de um óleo lubrificante, realizam-se análises físico-químicas que permitem fazer uma pré-avaliação de seu desempenho. Algumas destas análises não refletem as condições encontradas na prática, mas são métodos empíricos que fornecem resultados comparativos de grande valia, quando associados aos métodos científicos desenvolvidos em laboratórios. As provas de laboratório são importantes para o controle das operações de fabricação e como índice de uniformidade, porém, a medida final da qualidade e poder de lubrificação são resultados obtidos na prática e nas condições reais de serviço. Na refinação e produção de óleos lubrificantes, devem ser estabelecidos limites de tolerância, cobrindo numerosas propriedades e características, a fim de se obter o grau desejado de normalização dos produtos. Usam-se como limites básicos, várias propriedades físicas e químicas, conhecidas como especificações para óleos lubrificantes. Estas especificações são usualmente determinadas e expressas baseadas em testes padronizados, estabelecidos por órgãos normalizadores como a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), API (*American Petroleum Institute*), IBP (Instituto Brasileiro do Petróleo), ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), e outras.

No Brasil, a portaria 129/99 da ANP (ANP, 1999) estabelece o regulamento técnico ANP Nº4/99 [12] que especifica as características e tipos de ensaios realizados para os óleos básicos comercializados em todo o território nacional, sejam eles de origem nacional ou importados. De acordo com esta portaria, a verificação das características dos óleos far-se-á mediante o emprego das Normas Brasileiras Registradas (NBR), dos métodos da American Society for Testing and Materials (ASTM) e da *Deutsches Institut für Normung*

(DIN). As principais características definidas no regulamento técnico Nº 4/99 seguem abaixo:

1. **2.2.1 Cor:**

A cor possui maior utilização no controle da produção dos óleos lubrificantes. Possíveis contaminações ou indícios de oxidação podem ser indicados justamente na variação da cor do óleo produzido, podem ser utilizado como uma primeira análise do fluido. O resultado é expresso na forma de um número correspondente a uma escala de cores. O critério de uniformidade deve ser observado pelos fabricantes, pois uma alteração nesta característica produz um efeito psicológico grande nos usuários. [11]

2. **2.2.2Viscosidade:**

A viscosidade é uma das propriedades mais importantes dos lubrificantes. O valor da viscosidade dos óleos lubrificante se altera com a temperatura, carga, taxa de cisalhamento e pressão. A viscosidade do lubrificante está diretamente relacionada à sua capacidade de manter separadas as superfícies em movimento relativo que formam um par de atrito (MENEZES et al., 2013). A viscosidade pode ser dinâmica ou cinemática.

3. **2.2.2.1 Viscosidade dinâmica**

A viscosidade dos fluidos é uma medida de resistência dos fluidos a deformação por cisalhamento. Ela por ser definida através do escoamento de Couette, ilustrado na Figura 1.[13]

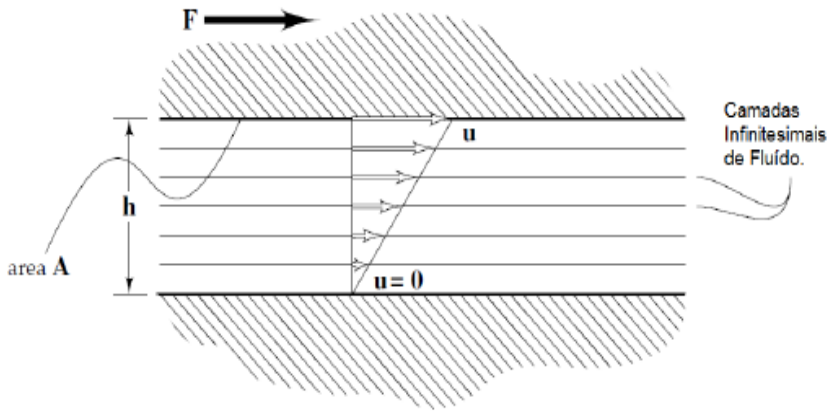


Figura 1- Representação esquemática do escoamento de Couette

.

A força aplicada é proporcional à área da superfície da placa superior e ao gradiente de velocidade e a viscosidade

$$F \propto A\frac{u}{h} \qquad (1)$$

É possível reescrever a equação anterior definindo uma constante de proporcionalidade (μ).

$$F = \mu A\frac{u}{h} \qquad (2)$$

$$\tau = \mu\frac{du}{dy} \qquad (3)$$

Esta relação é a lei de Newton para fluidos. A maioria dos fluidos respeitam essa relação e são os chamados fluidos newtonianos, os que não respeitam são fluidos não-newtonianos. Fluídos newtonianos são aqueles em que a viscosidade depende da temperatura, mas são independentes da taxa de cisalhamento a que estão submetidos. Entre estes estão a água e óleos monoviscosos. Se a relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade não for constante, o comportamento é

conhecido como não-newtoniano. No presente trabalho, buscou-se avaliar um sensor para óleo com comportamento de fluido Newtoniano.

4. 2.2.2.2 Viscosidade cinemática

A viscosidade cinemática é definida como a razão entre a viscosidade dinâmica e a massa específica do fluido, conforme a equação a seguir:

$$\upsilon = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

Logo, com a medição da viscosidade dinâmica e a densidade é possível obter também a viscosidade cinemática.

5. 2.2.3 Relação entre viscosidade e temperatura

A viscosidade de um óleo varia com a temperatura, dependendo da natureza ou composição do óleo. A viscosidade dos óleos minerais e sintéticos diminui com o aumento da temperatura. Os lubrificantes são formulados com óleos básicos que possam dar uma boa relação de viscosidade e temperatura (VT), pois é necessário que os óleos lubrificantes mantenha a viscosidade adequada a altas temperaturas para que a lubrificação seja eficaz. Essa relação VT é importante, visto que ela ajuda na avaliação da faixa de operação dos fluidos de lubrificação. Existem três métodos de determinação das características VT de um fluido; através da constante de viscosidade – temperatura (CVT), através dos gráficos ASTM (ASTM D341) e através do índice de viscosidade (IV). Segundo Rizvi [19], o método IV é o mais comum na indicação das características dos lubrificantes.

6. 2.2.3.1 Constante de viscosidade-temperatura (CVT)

A constante de viscosidade-temperatura é uma indicação menos arbitrária da variação da viscosidade com a temperatura. A CVT foi introduzida para se ter uma melhor

diferenciação do comportamento viscosidade-temperatura, quando a influência da temperatura é baixa. Para faixas entre de 40 e 100ºC ela pode ser calculada utilizando a seguinte equação:

$$CVT = 1 - \frac{viscosidade\ a\ 100ºC}{viscosidade\ a\ 40ºC} \quad (5)$$

Quanto menor for o CVT, menor será o IV.

7. 2.2.3.2 ASTM (ASTM D341)

A variação da viscosidade com a temperatura não possui um comportamento linear, porém se utilizar da escala log para temperatura e log.log para a viscosidade, a curva se aproxima de uma reta. A equação de Ubbelohde-Walther, abaixo, é a base para para determinar a viscosidade de um óleo de acordo com a norma ASTM.

$$\log\log v + C = K - m\ log\ T \quad (6)$$

Onde C e K são constantes, T é a temperatura em Kelvin e m é o coeficiente linear da reta que relaciona a viscosidade e temperatura. A constante C para óleo minerais, está entre os valores de 0,6 a 0,9 [20].

A equação na escala logarítmica permite representar a variação da viscosidade de um óleo com a temperatura através de uma reta, facilitando a obtenção por interpolação da viscosidade do mesmo óleo em qualquer temperatura, desde que se conheçam as suas viscosidades nas duas temperaturas, pelas quais se define a sua reta característica.

8. 2.2.3.3 Índice de viscosidade (IV)

É a característica indicativa da variação da viscosidade com a temperatura. Quanto maior for o IV de um óleo, menor será a tendência de que a viscosidade do óleo mude com as variações de temperatura. O IV é constante para cada lubrificante, mas difere entre os variados tipos de lubrificantes. Os óleos sintéticos tendem a ter um IV melhor do

que os óleos minerais. O método de caracterização do IV, apresentado na figura a seguir, foi descrito por E. W. Dean e F. H. Davis. Eles desenvolveram um método empírico em 1928 e que se baseia na adoção de dois óleos padrões como termos de comparação percentual, para calcular o IV. Adotaram-se duas famílias de óleos com o maior e o menor valor de IV na época. A primeira família, de óleos básicos parafínicos tendo um elevado índice de viscosidade, IV = 100, e a segunda família, de óleos básicos naftênicos que tem um baixo índice de viscosidade, IV = 0. Assim, o IV de todos os outros óleos permaneceria entre estes valores. É este método que determina, internacionalmente o comportamento da viscosidade em relação à temperatura[20]. Na Fig. 2, U é a viscosidade a 100 ºF do desconhecido, L é a viscosidade a 100 ºF de um óleo de 0 IV com a mesma viscosidade a 210 ºF que U, e H é a viscosidade a 100 ºF de um óleo 100 IV com a mesma viscosidade a 210 ºF que U. Uma mudança nas temperaturas de referência de 98,9ºC e 37,8 ºC para 100ºC e 40ºC teve pouco ou nenhum efeito sobre a viscosidade de um óleo [22].

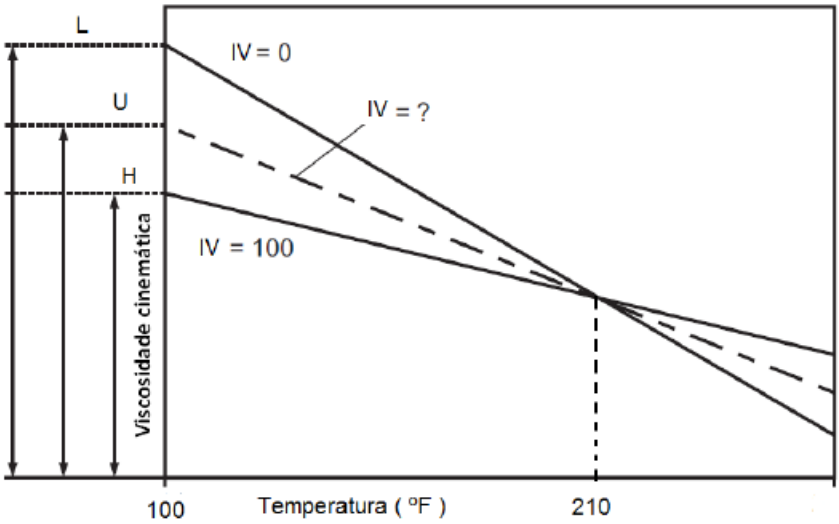


Figura 2- Representação do indicador de viscosidade

Quando o IV é menor que 100, o valor deste índice é calculado da seguinte forma:

$$IV = 100\frac{L-U}{L-H} \qquad (7)$$

Segundo Booser [22] a correlação empírica que deve ser usada para determinar IVs maiores que 100 é:

$$IV = \left[\frac{(antilog\ N)-1}{0{,}00715}\right] + 100 \qquad (8)$$

Sendo N:

$$N = \frac{\log H - \log U}{\log Y} \quad (9)$$

Onde Y é a viscosidade cinemática a 100ºC para o fluido de interesse.

É notável que um elevado IV é necessário em determinadas aplicações para que o óleo lubrificante possa realizar suas principais funções através de um extenso *range* de temperaturas. A adequada lubrificação dos motores a combustão interna, exige que o fluido não se torne espesso demais em baixas temperaturas, visto que isto poderia acarretar em problemas de partida a frio do motor, e promova a circulação mais rápida do óleo lubrificante durante aquecimento. Em temperaturas de trabalho mais elevadas, o óleo deve manter a viscosidade adequada, de modo a manter a película de lubrificação necessária nas partes mais quentes do motor e ainda manter uma boa vedação dos anéis, sem comprometer o consumo do óleo, através de vazamentos.

2.2.4 Densidade

A densidade absoluta ou massa específica de uma substância qualquer de massa m e volume V é a razão entre a massa de um corpo e o volume que esse corpo ocupa no espaço em que está inserido, ou seja:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (10)$$

A densidade absoluta é uma propriedade específica, isto é, cada substância pura tem uma densidade própria, que a identifica e a diferencia das outras substâncias. A densidade relativa de um material é a relação entre a sua densidade absoluta e a densidade absoluta de uma substância estabelecida como padrão, normalmente a água, ou seja, corresponde à razão entre as densidades absolutas de duas substâncias.

A densidade depende também da temperatura, pressão e principalmente, da natureza da sua estrutura cristalina, pois dois materiais podem ter a mesma composição química, as estruturas cristalinas diferentes, o que difere também a densidade do material.

Ao aumentar-se a temperatura de um determinado líquido, tem-se um aumento do volume fixo deste, pois haverá a dilatação ocasionada pela separação dos átomos e moléculas, considerando que a densidade é a relação da massa pelo volume, pode se concluir que a densidade do líquido diminui. Ao contrário, ao se diminuir a temperatura de um determinado líquido, tem-se uma diminuição deste volume fixo, o que faz com que a densidade aumente.

2.2.5 Ponto de fulgor

O ponto de fulgor é outra característica importante nos lubrificantes, é a temperatura em que o óleo, quando aquecido, desprende os primeiros vapores que só inflamam em contato a alguma chama. Em condições de alta temperatura, o óleo deve permanecer líquido, ou seja, não deverá atingir o ponto de fulgor, evitando assim, a queima do óleo e a falta de lubrificação. Os óleos para motores a combustão interna, devem ter elevado ponto de fulgor para evitar o risco de incêndio nas altas temperaturas em que trabalham. No caso de óleos usados, o aumento do ponto de fulgor significa perda das partes leves por evaporação, enquanto que sua redução indica que houve contaminação por combustível ou outro produto de menor Ponto de Fulgor.

2.2.6 Ponto de Fluidez

O ponto de fluidez fornece a temperatura mínima em que o óleo pode ser resfriado de maneira que ainda possa fluir. O óleo deve manter sua fluidez, em baixas temperaturas, de forma que permita escorrer livre e facilmente, afim de promover uma adequada lubrificação das partes que compõem o motor.

2.3 Classificação dos lubrificantes

A classificação dos lubrificantes surgiu de uma necessidade que os tinham em padronizar seus produtos para serem melhores identificados pelo consumidor. As siglas que formam essa classificação atualmente são baseadas em normas de acordo com seu uso, qualidade e destinação. O óleo é classificado após testes específicos que determinam as funções, composições, características físicas, entre outros requisitos [14]. Atualmente existem diversos órgãos reguladores que classificam óleos lubrificantes, dentre eles:

SAE - *Society of Automotive Engineers*: É a classificação mais antiga para lubrificantes automotivos para motor e transmissão, definindo faixas de viscosidade e não levando em conta os requisitos de desempenho. Sua criação começou no início de 1900 quando os grandes produtores de carros começaram a surgir nos EUA e Europa e foi oficializada em 1905, tendo como 1° presidente Andrew Riker e como o 1° Vice – Presidente, Henry Ford, quem se tornaria mais tarde um marco na história.

API - *American Petroleum Institute*: Seu começo pode ser rastreado a partir da 1ª Guerra Mundial, quando o Congresso e indústrias de petróleo e gás natural americanas trabalharam juntas para se fortalecerem. A API foi oficialmente estabelecida em 20 de março de 1919 e elaborou, em conjunto com a ASTM (*American Society for Testing and*

Materials), especificações que definem níveis de desempenho que os óleos lubrificantes devem atender.

ACEA - *Association des Constructeurs Européens de l´Automobile*: Associa alguns testes da classificação API, ensaios de motores europeus (Volkswagen, Peugeot, Mercedes Benz, etc.) e ensaios de laboratório.

JASO - *Japanese Automobile Standards Organization*: Define especificação para a classificação de lubrificantes para motores dois tempos (FA, FB e FC, em ordem crescente de desempenho).

NMMA - *National Marine Manufacturers Association*: Substituiu a antiga BIA (*Boating Industry Association*), classificando os óleos lubrificantes que satisfazem suas exigências com a sigla TC-W (*Two Cycle Water*), aplicável somente a motores de popa de dois tempos. Atualmente encontram-se óleos nível TC-W3, pois os níveis anteriores estão em desuso.

2.3.1 Classificação API

O sistema de classificação de óleos da API possibilita que os óleos sejam definidos com base na suas características de desempenho e no tipo de função ao qual se destinam. Este sistema permite o acréscimo de novas categorias conforme os projetos dos motores a combustão interna mudam e se exige mais do óleo lubrificante.

Segundo Kimura [30], a API classifica os óleos utilizados em motores de ignição por compressão com a sigla C e uma segunda letra em ordem crescente que determina o avanço tecnológico do óleo, desta forma um óleo API de classificação CD apresenta uma menor proteção ao motor do que um de classificação API CG, por exemplo.

Segundo Bertinatto [31], no Brasil, a resolução da ANP nº 10/2007 estabelece que o nível de desempenho mínimo, a ser comercializado é o CF. A API já considera que lubrificantes com classificação API A, B, C, D e E, não sejam mais comercializados, pois

os níveis de aditivação presentes em lubrificantes de classificação superior atendem perfeitamente os motores enquadrados para tais classificações.

Abaixo segue a classificação API para motores ciclo Diesel [14].

CA – Óleo com aditivos que promovem uma proteção aos mancais, contra a corrosão, desgaste, evitando a formação de depósitos de altas temperaturas. Óleo para uso em motores Diesel não turbinados (com aspiração normal no ar), operando em condições suaves ou moderadas, com combustível de baixo teor de enxofre (0,4 %). Este tipo de óleo foi largamente usado nas décadas de 1940 e 1950.

CB – Óleo com aditivos, proporcionando a mesma proteção que os óleos de Classe CA, mas em maior grau, devido à utilização de um combustível de elevado teor de enxofre. Óleo para uso em motores Diesel, operando em condições suaves ou moderadas, com combustível de elevado teor de enxofre (1%).

CC – Esses óleos proporcionam proteção contra depósitos de altas temperaturas e formação de borra de baixa temperatura. Também possuem proteção contra ferrugem, desgaste e corrosão. Óleo para uso em motores Diesel turbinados com baixa taxa de superalimentação, operando sob condições de moderadas a severas, com qualquer tipo de combustível.

CD – Óleo com aditivos, proporcionando a mesma proteção que os óleos classe CC, mais em maior grau. Indicado para motores Diesel turbinados com alta taxa de superalimentação, operando em condições severas e com qualquer tipo de combustível.

CD-2 – Motores Diesel 2 tempos, trabalhando em serviço severo.

CE – Óleo com aditivos, superando a categoria CD em ensaios mais severos de desempenho. Satisfaz as exigências dos fabricantes americanos quanto ao consumo de óleo lubrificante, combustível, controle de depósitos, desgaste e corrosão. Homologada em abril de 1987. Indicado para motores Diesel turbo alimentados em serviço severo.

CF – Categoria introduzida a partir de 1994, podendo ser usada em substituição a API CE. Para serviços em motores Diesel de injeção indireta e outros, incluindo os que usam Diesel com alto teor de enxofre (acima de 0,5%). Apresenta efetivo controle dos depósitos nos pistões, corrosão em mancais e desgaste, sendo os motores superalimentados, turbinados ou de aspiração natural.

CF-2 – Para serviço em motores Diesel de 2 tempos que requerem efetivo controle de desgaste e depósitos. Esta categoria demonstra superior desempenho em relação aos óleos da classificação CD-2, podendo substituí-la.

CF-4 – Esta classificação foi criada em 1990 para uso em motores Diesel quatro tempos operando em altas velocidades. O CF-4 excede os requisitos do API CE no que tange a um maior controle de consumo de lubrificante e depósitos nos pistões.

CG-4 – Categoria introduzida em 1994, desenvolvida especialmente para uso em motores projetados para atender aos níveis de emissão do EPA (*Environmental Protection Agency*) podendo ser usada nos motores Diesel de alta rotação em uso rodoviário, usando óleo Diesel com teor de enxofre inferior a 0,5 %. Os óleos desta categoria destacam-se pela proteção aos motores contra depósitos em pistões operando em altas temperaturas, espuma, corrosão, desgaste, estabilidade a oxidação e acúmulo de fuligem.

CH-4 – Categoria disponível a partir de dezembro de 1998. A classificação API CH-4 foi desenvolvida para atender à rigorosos níveis de emissão de poluentes, em motores de alta rotação e esforço, que utilizam óleo Diesel com até 0,5 % de enxofre. Os óleos desta categoria proporcionam especial proteção contra desgaste nos cilindros e anéis de vedação, além de possuírem o adequado controle de volatilidade, oxidação, corrosão. A classificação CH-4 substitui as classificações anteriores para motores de quatro tempos a Diesel

2.3.2 Classificação SAE

A classificação SAE não considera o desempenho do produto, mas apenas a sua viscosidade. A viscosidade de um óleo é a medida da sua resistência ao escoamento e varia conforme a temperatura.

A SAE desenvolveu um sistema de classificação baseado nas medições de viscosidade. Para óleos de motores, este sistema estabeleceu 11 tipos de classificações ou graus de viscosidade: SAE 0W, 5W, 10W, 15W, 20W, 25W, 20, 30, 40, 50 e 60. O W que se segue ao grau de viscosidade SAE significa inverno (*winter*) e indica que um óleo é adequado para uso em temperaturas mais frias. Os óleos que tem a designação W devem ter o valor de viscosidade adequado quando medida nas temperaturas baixas. As classificações SAE que não incluem o W definem graduações de óleo para uso em temperaturas mais altas. A viscosidade desses óleos SAE 20, 30, 40 e 50 devem ter o valor adequado quando medida a 100° C.

O desenvolvimento dos melhoradores de índice de viscosidade possibilitou a fabricação dos óleos de múltipla graduação e de boa qualidade, este tipo é também conhecido como óleo multiviscoso. Esses óleos, SAE 20W40, 20W50, 5W40, por exemplo, são largamente usados, porque ao dar partida no motor o óleo está frio. Nesta temperatura ele deve ser "fino" o suficiente para fluir bem e alcançar todas as partes do motor. Já em altas temperaturas, ele deve ter a viscosidade adequada para manter a película protetora entre as partes metálicas, garantindo a lubrificação adequada a temperatura de trabalho do motor.

Os óleos multigraus podem ser usados em uma gama maior de temperaturas do que os óleos monoviscoso. Suas características de temperatura/viscosidade proporcionam partida e bombeio fáceis em baixas temperaturas, todavia, eles são viscosos o bastante em altas temperaturas.

Quanto menor for o índice W, mais rápido o óleo fluirá no momento mais crítico, que é o da partida, evitando o contato entre as partes metálicas e minimizando o desgaste. O número sem o W refere-se à viscosidade do óleo na temperatura de operação do motor. Assim, um óleo 5W40 terá o mesmo comportamento de viscosidade a quente, que um óleo 15W40 já que ambos serão SAE 40. Sua viscosidade na partida a frio, entretanto, será menor, permitindo que o lubrificante atinja a parte alta do motor mais rapidamente [14].

Tabela 3 - Tabela de classificação SAE J300

Grau de Viscosidade SAE	Viscosidade (cP) A temp. °C máxima		Viscosidade (cSt) a 100 °C (4)		Viscosidade (cSt) após cisalhamento (5)
	Partida (2)	Bombeamento(3)	Mín	Máx	
0 W	6.200 até -35 °C	60.000 até -40 °C	3,8	-	
5 W	6.600 até -30 °C	60.000 até -35 °C	3,8	-	
10 W	7.000 até -25 °C	60.000 até -30 °C	4,1	-	
15 W	7.000 até -20 °C	60.000 até -25 °C	5,6	-	
20 W	9.500 até -15 °C	60.000 até -20 °C	5,6	-	
25 W	13.000 até -10 °C	60.000 até -15 °C	9,3	-	
20	-	-	5,6	<9,3	2,6
30	-	-	9,3	<12,5	2,9
40	-	-	12,5	<16,3	2,9 (6)
40	-	-	12,5	<16,3	3,7 (7)
50	-	-	16,3	<21,9	3,7
60	-	-	21,9	<26,1	3,7

Notas:
1) Valores com especificações definidas pela ASTM D-3244
2) Viscosidade aparente utilizando o Simulador de partida a frio (CCS) - Método ASTM D 5293.
3) Viscosidade aparente utilizando o Viscosímetro rotativo (MRV) - Método ASTM D 4684.
4) Viscosidade cinemática utilizando Viscosímetro capilar - Método ASTM D 445.
5) Viscosidade após cisalhamento de 10^{-6}s, e temperatura de 150ºC utilizando o Viscosímetro simulador de rolamento selado - Método ASTM D 4683.
6) Para óleos SAE 0W40, 5W40 e 10W40.
7) Para óleos SAE 15W40, 20W40, 25W40 e 40.

2.4 Medidores de viscosidade para óleo

Existem diversos medidores de viscosidade disponíveis no mercado, como por exemplo os viscosímetros rotacionais. O princípio de funcionamento desse tipo de viscosímetro corresponde a um motor síncrono, que gira em velocidade estável e gira o *spindle* (rotor de aço inox) que está ligado a uma haste através de uma mola. Se não houver resistência do fluido o *spindle* girará sincronizado com a mola, o indicador que corresponde ao disco graduado neste caso deverá mostrar a leitura zero. Caso o *spindle* seja submetido a certa resistência pela viscosidade da substância de teste, então haverá um torque na mola e o indicador conectado à mola deverá indicar uma leitura particular (o momento de torção da mola) no disco graduado do instrumento. O viscosímetro rotativo é um instrumento que necessita ser calibrado para que o resultado obtido esteja correto [15]. Existem, também, viscosímetros capilares, onde a viscosidade é medida pela velocidade de escoamento do liquido através de um capilar de vidro. É medido o tempo de escoamento do liquido entre duas marcas feitas no viscosímetro. Nos viscosímetros de Stokes, a viscosidade é medida pela velocidade de queda de uma esfera dentro de um liquido colocado em um tubo vertical de vidro. A viscosidade é estimada pelo tempo que uma esfera gasta para percorrer o espaço entre duas marcas tubo. Esses são somente alguns exemplos de viscosímetros encontrados. Uma característica comum a todos os equipamentos é a necessidade de se retirar uma amostra de fluido para análise, que normalmente é realizada em um laboratório, sob condições controladas.

A diversidade de medidores portáteis é bem menor. Um exemplo de medidor de viscosidade portátil que vêm sendo investigado na literatura, são os sensores microacústicos, que se baseiam em um ressonador de quartzo. Esses dispositivos consistem basicamente em um cristal piezoelétrico excitado na sua frequência natural. Quando imerso

em um fluido o dispositivo exibe alterações na frequência de ressonância [16]. O dispositivo possui algumas características similares àquele proposto no presente trabalho. As principais diferenças estão relacionadas com as frequências naturais e o modo de operação do sistema. Na literatura, as frequências de trabalho giram em torno de algumas centenas de kHz até MHz. Enquanto que no presente trabalho a resposta em frequência do equipamento é de algumas centenas de Hz. Além disso, o modo de operação dos equipamentos é diferente. Na literatura utiliza-se excitação periódica na frequência de ressonância do equipamento. Neste trabalho a perturbação é do tipo degrau, e observa-se o amortecimento do sistema, além da frequência natural de oscilação.

.

3. Sensor proposto

3.1 Efeito piezoelétrico

Existem materiais que, sob pressão ou tensão mecânica, geram cargas elétricas em sua superfície. Este fenômeno descoberto em 1880 por Jacques Curie e Pierre, foi denominado efeito piezoelétrico. A descoberta ocorreu durante os estudos do efeito da pressão na geração de carga elétrica pelo cristais de quartzo, esfarelita e turmalina. Desde então, há uma grande motivação para diversas investigações afim de desenvolver os transdutores eletromecânicos. [17]

O efeito consiste basicamente na conversão de energia mecânica em elétrica. "piezo", em grego, significa pressão. No ano seguinte ao descobrimento do efeito piezoelétrico, através da análise termodinâmica, foi prevista a existência do "efeito inverso", que consiste num aparecimento de uma deformação do material quando submetido a um campo elétrico. [18]. Esses cristais, quando são sujeitos a uma tensão externa, são capazes de sofrer variações em sua forma. Estes dispositivos possuem algumas aplicações de grande importância, tais como a produção e detecção de sons, a geração de altas tensões e também a geração de uma frequência eletrônica.

Figura 3- Representação esquemática da conversão de energia no efeito piezoelétrico

Os cristais de quartzo, turmalina, sal de Rochelle, topázio, etc. exibem efeito piezoelétrico em seu estado natural. A estrutura atômica do quartzo, por exemplo, é

constituída por uma hélice que se estende ao longo do eixo Z conforme esquematizado na Figura 4, com dois átomos de oxigênio (cargas negativas) e um de silício (carga positiva). No plano XY os átomos formam um hexágono que, no estado natural tem carga total nula. A aplicação de forças de tração ou compressão na direção X ou Y do cristal faz com que haja um desbalanceamento de cargas e gera cargas elétricas externas. A aplicação de forças no eixo Z não gera cargas elétricas. O efeito inverso, isto é, a aplicação campos elétricos externos nas direções X ou Y faz com que o material se deforme, sendo que a magnitude dessa deformação é proporcional a este campo [19].

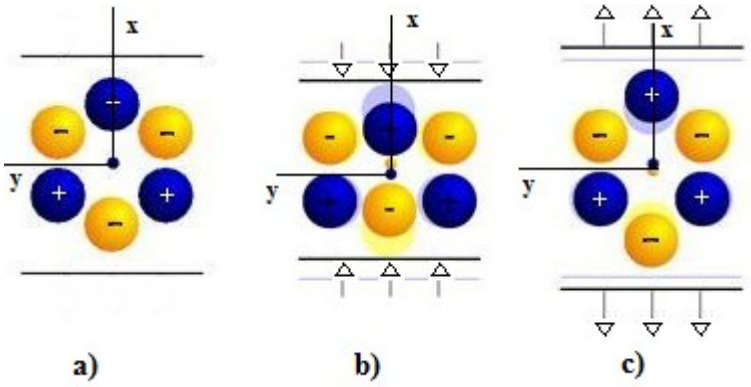


Figura 4- Estrutura atômica do quartzo no estado normal (a), em compressão (b) e tração (c), respectivamente

A primeira aplicação tecnológica de um transdutor piezoelétrico pode ser atribuída a Lagevin [36], que desenvolveu um sonar utilizando o quartzo como elemento piezoelétrico. Embora as primeiras aplicações de materiais piezoelétricos tenham sido realizadas utilizando cristais de quartzo, o maior crescimento do número de aplicações ocorreu a partir do descobrimento de um solução sólida de zirconato de chumbo ($PbZrO_3$) e titanato de chumbo ($PbTiO_3$), nos anos 50, que resultaram na obtenção dos piezoelétricos cerâmicos baseados nesses compostos químicos (titanato-zirconato de chumbo, conhecidos como PZT) [20].

O PZT é formado por blocos microscópicos chamados domínios que, por sua vez, são formados por células unitárias tetragonais distorcidas quando se encontram abaixo da temperatura Curie (Figura 5(a)). A célula unitária forma um dipolo elétrico devido à posição deslocada do íon de titânio ou zircônio e, dentro de um domínio, as células apresentam polarização e orientação na mesma direção. Como os domínios encontram-se distribuídos aleatoriamente, o PZT não apresenta propriedades piezoelétricas macroscópicas (Figura5 (a)). [21]

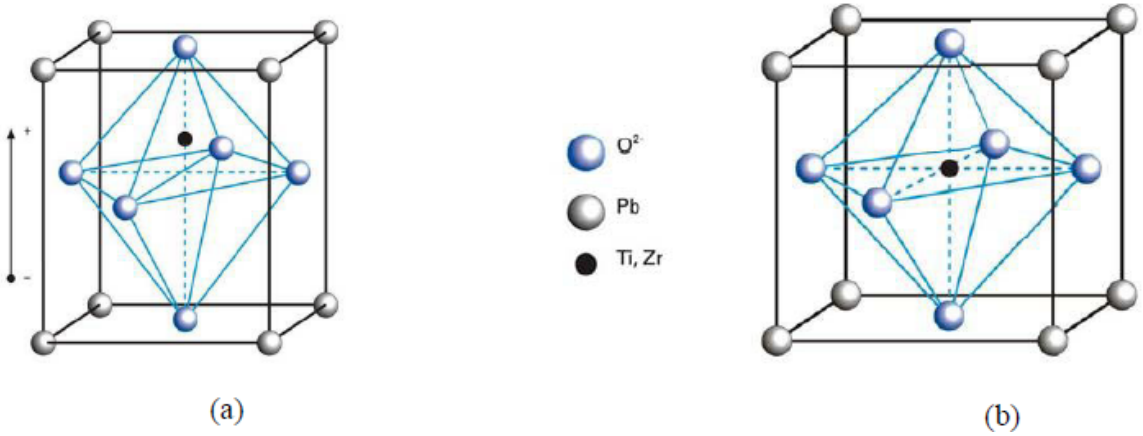


Figura 5- Estrutura atômica do PZT: a) Tetragonal distorcido; b) Cúbico

Entretanto, é possível polarizar o PZT de maneira que este passe a proporcionar o efeito piezoelétrico. Este procedimento é realizado aquecendo-se o material acima da temperatura Curie, de forma que o estado das células unitárias do material passa a apresentar simetria cúbica, como ilustrado na Figura 6 (a). Com o material aquecido, aplica-se um campo elétrico intenso e as células unitárias se expandem na direção deste campo, como mostrado na Figura 6 (b). Após o resfriamento do material e a retirada do campo elétrico, as células unitárias mantêm o alinhamento, porém não completamente

(Figura 6 (c)). Contudo o alinhamento remanescente é suficiente para que PZT passe a exibir o efeito piezoelétrico. [21]

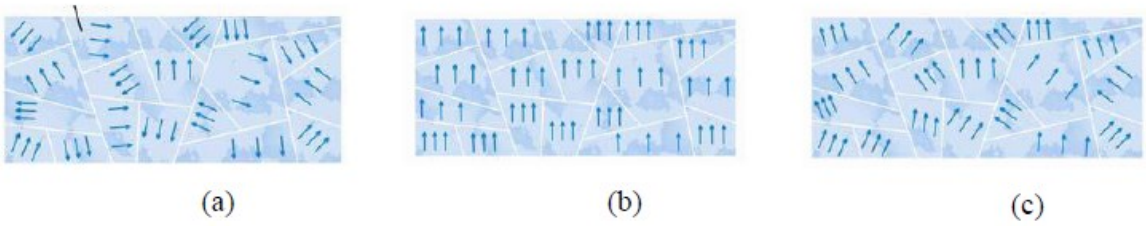


Figura 6 - a) PZT sem polarização; b) Campo elétrico aplicado; c) Resultado da polarização

Para esse projeto foi utilizado um transdutor piezoelétrico de baixo valor de mercado e fácil aquisição. O dispositivo utilizado é empregado em alarmes para emissão de alertas sonoros. O equipamento é composto de um disco com uma estrutura fina de membrana de piezocerâmica, uma folha de metal, geralmente em uma liga de níquel e uma parte composta recoberta por uma membrana de solução em gel usada como eletrodo. Comercialmente vendida por empresas de componentes eletrônicos, esse transdutor é conhecido como *buzzer* piezoelétrico, também chamado de diafragma piezoelétrico (Figura 7 (a)). Atualmente, o custo desse dispositivo é inferior a R$ 1,00.

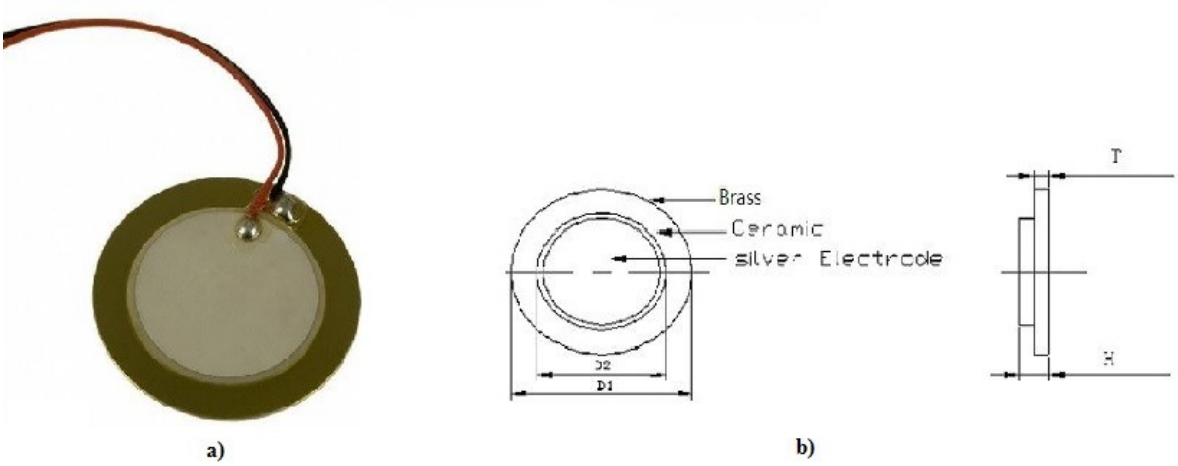


Figura 7- a) Imagem real do buzzer piezoelétrico utilizado no projeto; b) Desenho esquemático de um buzzer

Aplicando tensão elétrica continua entre os eletrodos de um diafragma piezoelétrico, faz-se distorção mecânica devido ao efeito piezoelétrico. A distorção para elementos piezoelétrico ocorre em todas as direções dependendo da frequência de excitação, porém preferencialmente para este elemento, a distorção se destaca numa direção radial. O diafragma piezoelétrico curva-se para o sentido mostrado na Figura 8 (a). Por outro lado, quando a placa de metal ligada ao elemento piezoelétrico contrai, há deformações do diafragma piezoelétrico na direção representada pela Figura 8 (b). Assim, quando a tensão alternada é aplicada à membrana, devido à contração e expansão do diafragma, ocorre oscilação conforme mostra a Figura 8 (c). [22]

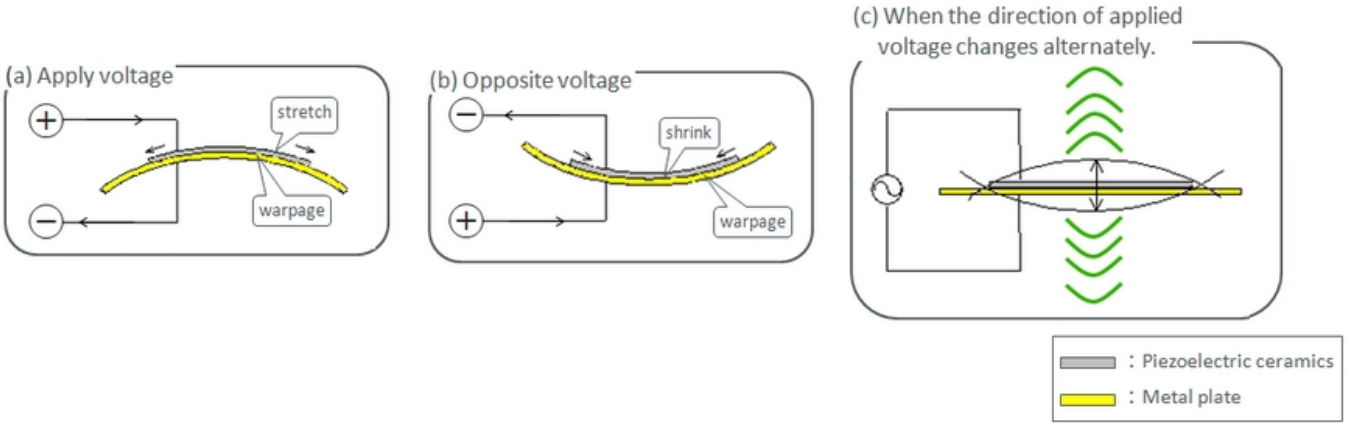


Figura 8 - a) Diafragma expandido; b) Diafragma contraído; c)Estrutura da vibração com repetição do cliclo

A representação simplificada do comportamento de um ressonador piezoelétrico, forçado a oscilar, é dada pelo circuito equivalente da Figura 9 (a) assim como seu modelo mecânico equivalente, Figura 9 (b). A ressonância mecânica do elemento é indicada por R, L e C, onde L e C determinam a frequência de ressonância [23].

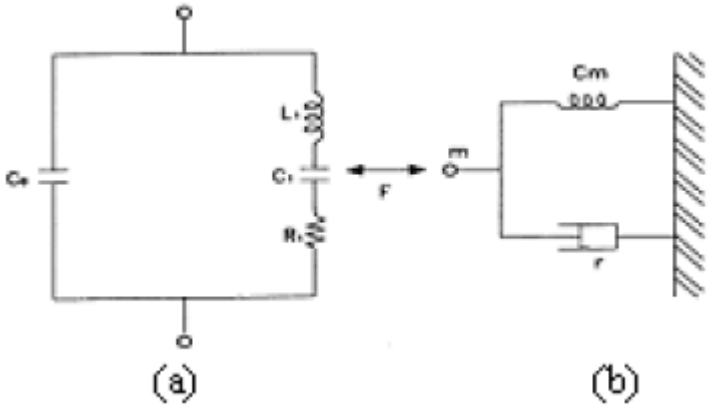


Figura 9- a) Circuito equivalente ao piezoelétrico; b) Equivalencia mecânica

A seguinte equação representa um circuito de oscilação elétrica representado por um circuito RLC em série, onde q é a carga e V é a tensão aplicada. [24]

$$L_1 \frac{d^2q}{dt^2} + R_1 \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C_1} q = V \quad (11)$$

Para o transdutor piezoelétrico, o modelo elétrico pode ser representado em um modelo mecânico através da utilização do fator de acomplamento eletromecânico k como uma analogia eletromecânica, ou seja, a eficiência piezoelétrica de um material é medida através da razão entre força mecânica aplicada e a força elétrica produzida. A equação a seguir representa o modelo mecânico equivalente. Onde *x* é o deslocamento, *m* é a massa, *r* é o coeficiente de atrito e *Cm* é a elasticidade. [24]

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + \frac{1}{C_m} x = kV \quad (12)$$

É possível chegar a uma correspondência aos fatores para o circuito elétrico e o mecânico equivalente, comparando-se as duas equações anteriores.

$$L_1 = \frac{m}{k^2} \quad (13)$$

$$C_1 = C_m k^2 \quad (14)$$

$$R_1 = \frac{r}{k^2} \quad (15)$$

É possível notar a correspondência à alguns fatores nas equações anteriores; ao fator de indutância está a massa, à capacitância está a elasticidade e à resistência está o atrito, ou seja, a resistência ressonante R_1 reflete a resistência mecânica do transdutor piezoelétrico, a capacitância C_1 reflete a elasticidade do mesmo e a indutância L_1 reflete a massa total do transdutor piezoelétrico e o líquido que está em contato com ele. [21]

A resistência ressonante do transdutor piezoelétrico, é a resistência do circuito equivalente, que em contato com o líquido pode ser representado conforme segue a equação 16. [24]

$$R_1 = \frac{(2\pi f \rho_L \eta)^{\frac{1}{2}} A}{k^2} \quad (16)$$

Onde f representa a frequência de ressonância, ρ_L corresponde à densidade do líquido, η viscosidade do líquido e A à área da superfície. Utilizando o circuito equivalente, a frequência de ressonância do transdutor piezoelétrico é:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (17)$$

Esta equação implica que a mudança da frequência de ressonância inclui as informações da mudança de massa e alteração da elasticidade sobre o transdutor piezoelétrico. Nota-se que tanto a massa e a viscosidade influenciam a resposta do transdutor. Nesse trabalho, deseja-se investigar a sensibilidade de um transdutor piezoelétrico a variação de viscosidade. [21]

Para a realização do experimento, foi projeto um sensor com dois transdutores piezoelétricos conforme a Figura 10. O sensor projetado para o experimento é composto de dois transdutores piezoelétricos que são colados um ao outro com uma camada de cola epóxi entre eles, garantindo que o primeiro transdutor que receberá o sinal esteja eletricamente isolado do segundo transdutor que irá responder ao sinal de vibração. Inicialmente os dois transdutores foram fixados em um componente de PVC (policloreto de vanila); porém ao realizar um teste com as peças montadas, foi possível perceber que o PVC interferia na vibração do transdutor piezoelétrico, alterando assim o amortecimento do conjunto. Logo foi necessário escolher um outro material, mais rígido, para aumentar a rigidez do sistema

e diminuir o amortecimento. Escolheu-se latão para a montagem dos sensores afim de evitar a formação de pilha galvânica, já que os discos metálicos dos transdutores piezoelétricos também são de latão. É possível visualizar o produto final da montagem na Figura 11.

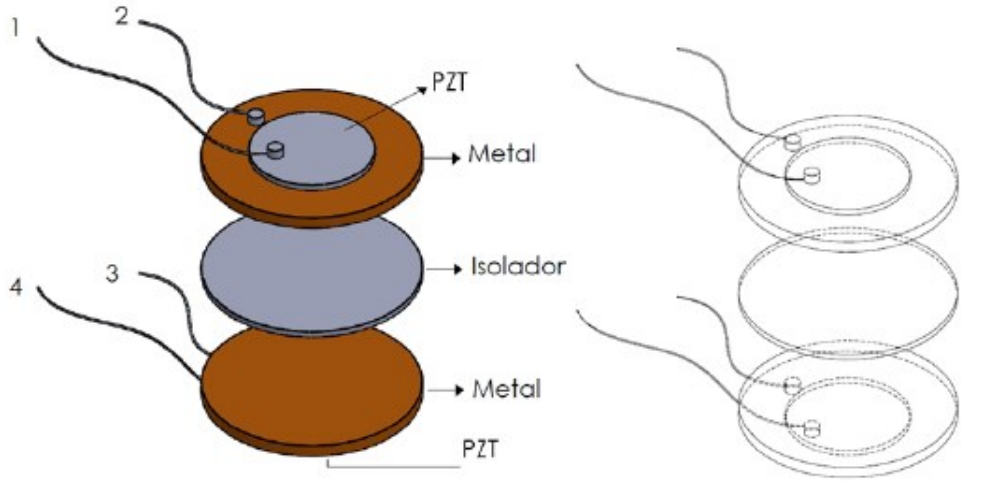


Figura 10- Montagem dos dois transdutores piezoelétrico, unidos por uma camada de cola epóxi

Figura 11 - Montagem final dos transdutores ao corpo de latão

Aplicando-se uma tensão alternada no primeiro transdutor, ela faz com que o mesmo produza vibrações mecânicas que são transferidas para o segundo transdutor. O segundo transdutor funciona como um detector de deformação, convertendo as vibrações

mecânicas num sinal elétrico que pode ser lido por uma placa de aquisição. Este conjunto de dois transdutores apresenta uma frequência de ressonância que depende da densidade e da viscosidade do líquido no qual está imerso. De acordo com a equação 16 essas duas propriedades estão acopladas e influenciam a resposta do medidor. Nesse trabalho, buscou-se avaliar a sensibilidade do dispositivo somente a variações de viscosidade e densidade isoladamente.

O método utilizado para colar um transdutor ao outro não deveria afetar a vibração do mesmo, ou seja, não poderia amortecê-lo e deveria isolar o contato elétrico. Por essa razão foi escolhido o epóxi afim de unir os transdutores através das suas partes metálicas. Os transdutores piezoelétrico apresentam a face do PZT voltada para o líquido e a parte colada possuía o mesmo potencial. Então o primeiro transdutor piezoelétrico é energizado com um sinal elétrico que faz com que o mesmo vibre mecanicamente como mostra a Figura 12. Considerando que o segundo transdutor piezoelétrico está em contato com o primeiro piezoelétrico, porém, isolados eletricamente, este segundo transdutor têm a função de receber a vibração mecânica e transformá-la em um sinal elétrico como mostra a Figura 12.

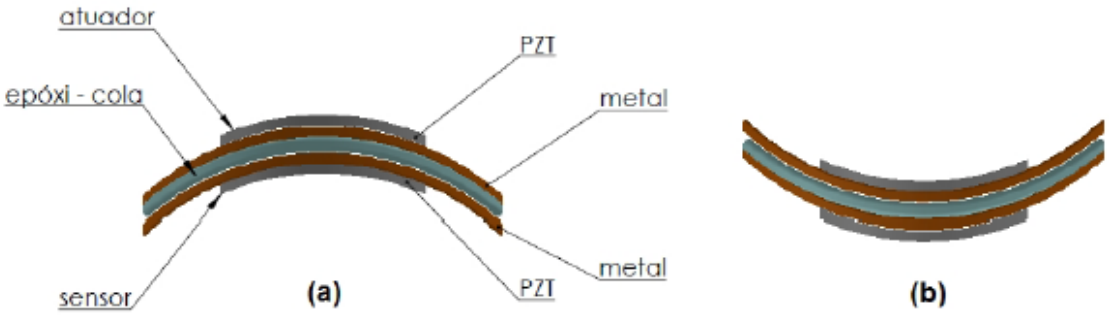


Figura 12 - Vibração do conjunto a) em expansão; b) em contração

3.2 Funcionamento do sensor

Sensores com capacidade acumulativa/dissipativa e inércia não são capazes de responder imediatamente as variações na entrada. Esse tipo de sistema pode ser modelado usando uma equação diferencial de segunda ordem, da seguinte forma [27]:

$$\frac{1}{\omega_n^2}\ddot{y} + \frac{2\xi}{\omega_n}\dot{y} + y = Kf(t) \quad (18)$$

Onde,

ω_n → Representa a frequência natural do sistema; $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$

ξ → Representa a razão de amortecimento do sistema. $\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}$

A solução para a equação característica fornece:

$$\lambda_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1} \quad (19)$$

Dependendo do valor do fator de amortecimento do sistema existem três tipos de possibilidade para a solução homogênea da EDO (Sistema amortecido, sistema criticamente amortecido e sistema subamortecido). Para esse experimento sabe-se o que fator de amortecimento será subamortecido, desta forma a solução homogênea da EDO é:

$$y_H(t) = C_1 e^{\lambda_{real} t}\cos(\lambda_{imag} t) + C_2 e^{\lambda_{real} t}\,\mathrm{sen}(\lambda_{imag} t) \quad (20)$$

Assumindo algumas condições iniciais para o sistema e calculando a solução particular da EDO, chega-se a seguinte solução:

$$y(t) = KA - KAe^{\lambda_{real}t}\cos(\lambda_{imag}t) - \frac{KA\lambda_{real}}{\lambda_{imag}}e^{\lambda_{real}t}\,\mathrm{sen}(\lambda_{imag}t) \quad (21)$$

Onde,

$$\lambda_{real} = -\xi\omega_n \quad (22)$$

$$\lambda_{imag} = \omega_n\sqrt{1-\xi^2} \quad (23)$$

A medida que ξ diminui a resposta tende a oscilar antes de convergir para o resultado e quando ξ=0 não há convergência. O período de oscilação é o inverso de λ_{imag}, que é a frequência natural amortecida do sistema.

De acordo com Jakoby [16], no caso de membranas imersas em líquidos a frequência natural é dada pela equação 24, onde m_0 é a massa inicial do sensor e m_f é a massa adicional induzida pelo fluido. Essa massa depende da densidade e da viscosidade do fluido. Assim como a massa, o amortecimento do sistema, representado por c, também tem uma componente adicional induzida pelo fluido, conforme equação 25, onde c_f é uma função da densidade e da viscosidade. No presente caso, deseja-se avaliar somente a variação da resposta do sensor com a mudança isolada de viscosidade do fluido ou densidade do fluido. No caso de viscosidade variável, a densidade deve ser mantida aproximadamente constante durante os ensaios. Essa situação se assemelha ao comportamento dos óleos lubrificantes em motores. Nos testes com fluidos de densidade variável, a viscosidade dos fluidos deve ser mantida aproximadamente constante.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_0+m_f}} \quad (24)$$

$$c = c_o + c_f \quad (25)$$

4. Metodologia

Os experimentos iniciaram a partir da determinação do fluido de trabalho, com o intuito de avaliar a resposta do sensor piezoelétrico. Escolheu-se como fluido de trabalho uma mistura com 90% de glicerol e 10% de água destilada. Essa mistura foi escolhida por apresentar propriedades de variação da viscosidade com a temperatura similar aos óleos lubrificantes. Além disso, essa mistura apresenta pouca variação de densidade com a temperatura. A partir de então, utilizando o viscosímetro rotacional da *Viscotech* modelo *vr 3000z (*Figura 13) *,* foi possível medir a viscosidade do fluido para diferentes temperaturas. Utilizou-se um óleo padrão para calibrar o equipamento. Foi necessário a utilização de um banho para que a temperatura da medição pudesse ser controlada, o equipamento utilizado nesse experimento foi o banho da *Ethiktechnology* modelo *521-2D* (figura 13).

Figura 103 - Viscosímetro rotacional da Viscotech à esquerda e banho da Ethiktechnology à direita

A Figura 14 ilustra, de forma esquemática, a forma com a qual foi medida a viscosidade, imergindo o béquer no banho (Figura 15) afim controlar a temperatura da mistura de glicerina. Vale notar que, na Figura 15, o béquer está lacrado através de duas camadas de papel filme e envolvido com fita adesiva, isso se deve ao fato de que a glicerina é altamente higroscópica. Isso significa que a glicerina é capaz de absorver água do ambiente e mudar sua composição.

Figura 14 - Ilustração da medição da viscosidade através dos transdutores piezoelétrico

Figura 15 - Béquer em banho para controle de temperatura da glicerina

Na metodologia empregada, o mesmo fluido foi testado simultaneamente no viscosímetro e no sensor piezoelétrico. O viscosímetro foi utilizado como padrão de referência para a viscosidade do fluido. A temperatura

Antes de começar o experimento foi necessário aferir o viscosímetro com um óleo padrão, de propriedades conhecidas, pois esse tipo de instrumento necessita ser aferido para que o resultado obtido esteja correto.

A Tabela 3 apresenta as temperaturas e as respectivas viscosidades (em cP). A partir dessa tabela foi possível selecionar os óleos padrões utilizados (OP35, OP100 e N26) para aferir o viscosímetro de acordo com as viscosidades esperadas para cada temperatura. [25]

Tabela 4 Viscosidade de soluções aquosas de glicerol em cP

Glyc. % Wt.	Temperature (°C)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0*	1.792	1.308	1.005	0.8007	0.6560	0.5494	0.4688	0.4061	0.3565	0.3165	0.2838
10	2.44	1.74	1.31	1.03	0.826	0.680	0.575	0.500	—	—	—
20	3.44	2.41	1.76	1.35	1.07	0.879	0.731	0.635	—	—	—
30	5.14	3.49	2.50	1.87	1.46	1.16	0.956	0.816	0.690	—	—
40	8.25	5.37	3.72	2.72	2.07	1.62	1.30	1.09	0.918	0.763	0.668
50	14.6	9.01	6.00	4.21	3.10	2.37	1.86	1.53	1.25	1.05	0.910
60	29.9	17.4	10.8	7.19	5.08	3.76	2.85	2.29	1.84	1.52	1.28
65	45.7	25.3	15.2	9.85	6.80	4.89	3.66	2.91	2.28	1.86	1.55
67	55.5	29.9	17.7	11.3	7.73	5.50	4.09	3.23	2.50	2.03	1.68
70	76	38.8	22.5	14.1	9.40	6.61	4.86	3.78	2.90	2.34	1.93
75	132	65.2	35.5	21.2	13.6	9.25	6.61	5.01	3.80	3.00	2.43
80	255	116	60.1	33.9	20.8	13.6	9.42	6.94	5.13	4.03	3.18
85	540	223	109	58	33.5	21.2	14.2	10.0	7.28	5.52	4.24
90	1310	498	219	109	60.0	35.5	22.5	15.5	11.0	7.93	6.00
91	1590	592	259	127	68.1	39.8	25.1	17.1	11.9	8.62	6.40
92	1950	729	310	147	78.3	44.8	28.0	19.0	13.1	9.46	6.82
93	2400	860	367	172	89	51.5	31.6	21.2	14.4	10.3	7.54
94	2930	1040	437	202	105	58.4	35.4	23.6	15.8	11.2	8.19
95	3690	1270	523	237	121	67.0	39.9	26.4	17.5	12.4	9.08
96	4600	1580	624	281	142	77.8	45.4	29.7	19.6	13.6	10.1
97	5770	1950	765	340	166	88.9	51.9	33.6	21.9	15.1	10.9
98	7370	2460	939	409	196	104	59.8	38.5	24.8	17.0	12.2
99	9420	3090	1150	500	235	122	69.1	43.6	27.8	19.0	13.3
100	12070	3900	1410	612	284	142	81.3	50.6	31.9	21.3	14.8

Os valores de viscosidade da mistura obtidos com o viscosímetro estão listados na tabela 4. Observa-se que os valores diferem um pouco daqueles tabelados. Isso ocorre devido à incerteza na mistura dos dois fluidos. De qualquer maneira, os resultados independem da precisão da fração da mistura. O importante para esse estudo é a medição da viscosidade da mistura e isso foi realizado com baixa incerteza.

Tabela 5. Rotação e viscosidade para cada temperatura

	Temperatura (ºC)								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Rotação (RMP)	0,6	0,6	2,5	4	6	6	10	12	12
Viscosidade (cP)	690,61	441,09	174,66	123,53	88,4	70,55	52,44	41,88	35,01

Na Figura 16 é possível ver graficamente o comportamento da viscosidade com a temperatura. Pode-se observar que a viscosidade dinâmica do fluido estudado tende a sofrer um decréscimo exponencial com a elevação da temperatura.

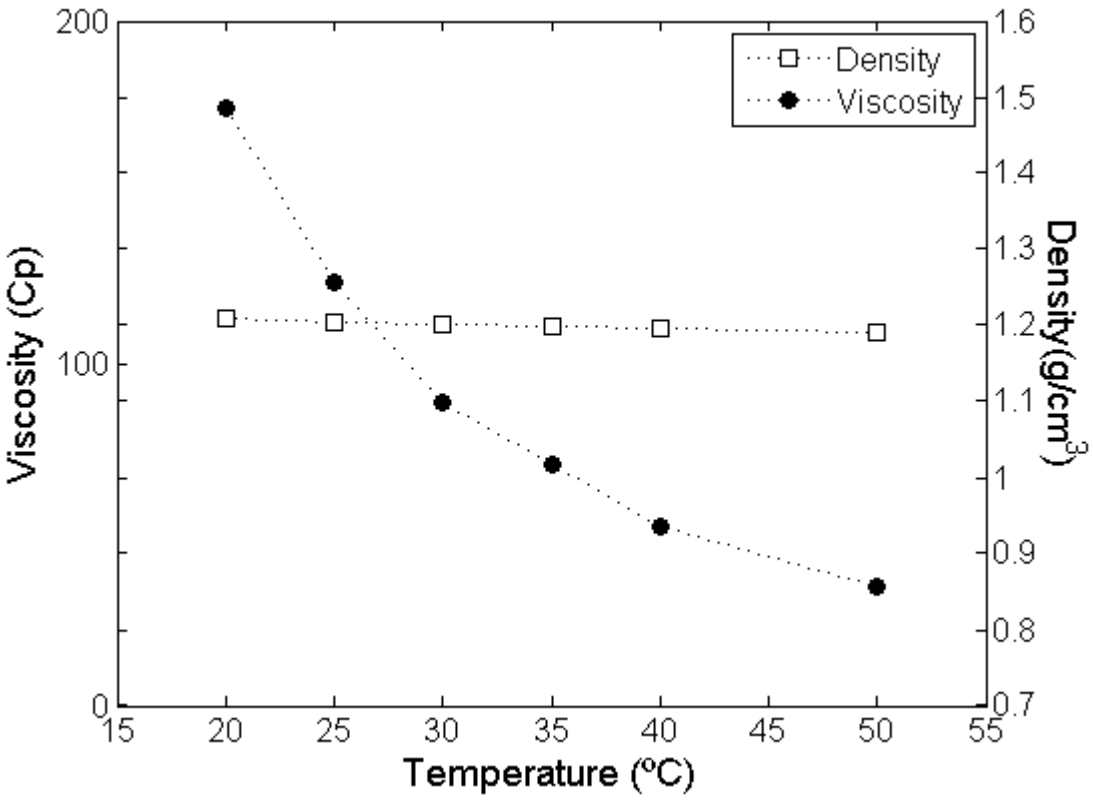


Figura 16 - Variação da viscosidade e da densidade da mistura de glicerina e água com a temperatura

4.1 Aquisição de dados

A vibração do transdutor piezoelétrico foi induzida através da aplicação de um degrau de tensão ao atuador. O gatilho para a variação de tensão no transdutor foi feito através do o software *LABVIEW® 2013* (ANEXO 1) com a geração de um sinal elétrico através da placa de som de um notebook. O sinal de tensão gerado pelo piezoelétrico passivo, foi coletada em uma placa de aquisição de dados USB-6009 da *National*

Instrument, juntamente com o software *LABVIEW® 2013* (ANEXO 3). O processo é ilustrado na figura 17.

Figura 17 - Sistema para aquisição de dados

A placa de aquisição de dados USB-6009 oferece funções básicas de aquisição de dados para aplicações simples de data *logging*, medições portáteis e experimentos de laboratórios acadêmicos, permitindo compartilhar sinais de resposta de sensores com computador através da porta USB. O modelo utilizado (Figura18) possui 8 canais de entradas analógicas com 14 bits de resolução e uma taxa de amostragem de 48 kS/s; 2 entradas analógicas com 12 bits de resolução e uma taxa de amostragem de 150 kS/s, 12 E/S digitais e contadores de 32 bits [26].

O sistema de aquisição de dados dispõe de um gatilho TTL para disparo das aquisições. Para adequar o sinal de saída da porta de áudio do laptop ao padrão TTL utilizou-se um circuito comparador de tensão. Desse modo, foi possível disparar a aquisição de dados de forma sincronizada com a perturbação do sensor. Com isso, foi possível aplicar técnicas de redução de ruído baseadas em médias de eventos. Os dados apresentados neste trabalho correspondem a uma média obtida a partir de 30 eventos.

Figura 18 - Placa de aquisição de dados NI USB-6009

Nas Figuras 19 e 20 é possível visualizar a bancada de testes, onde é possível apontar o viscosímetro, o banho, os dois transdutores piezoelétrico fixados na peça em latão e a placa de aquisição NI USB-6009.

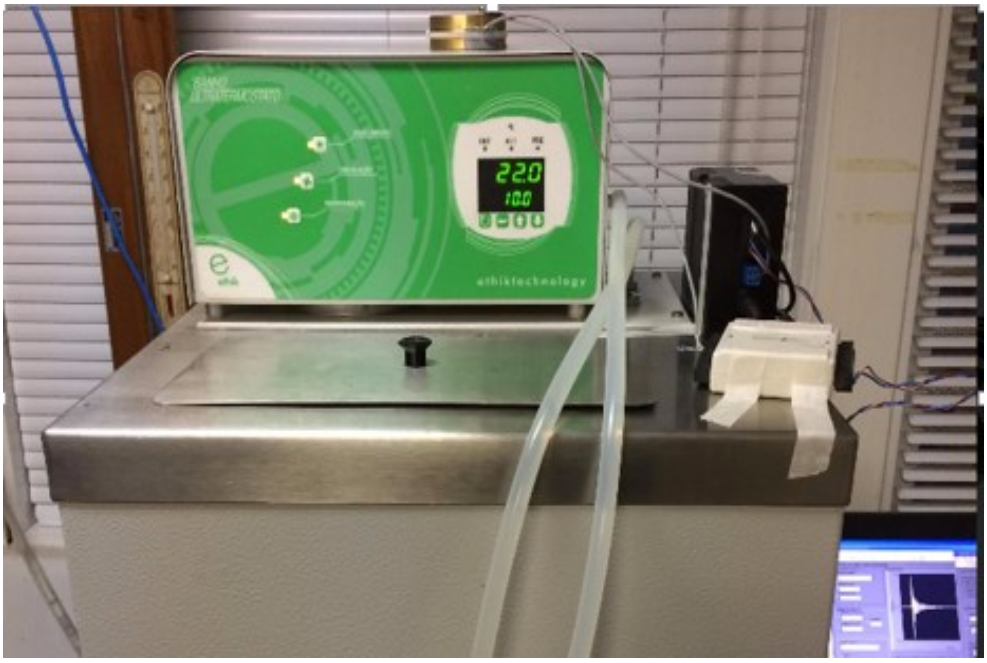


Figura 19 - Bancada de testes

Figura 20 – Bancada de testes

5. Resultados

Com intuito de determinar a frequência natural de vibração modificada a partir do sinal do sensor piezoelétrico, fez-se uso da transformada rápida de Fourier (em inglês, FFT) a partir da função *fft()* no *MATLAB*. A FFT permite trabalhar no domínio da frequência, permitindo assim melhor análise dos resultados vinculados a esse experimento. Vale ressaltar que para se trabalhar com a FFT é desejável um sinal periódico, sendo assim, realizou-se um espelhamento de sinal coletado, conforme ilustrado na Figura 21. Com isso, o decaimento do sinal medido pelo transdutor piezoelétrico ficou simétrico, em relação ao eixo vertical. Dessa maneira, reduziu-se o espalhamento de energia no espectro de frequência e assim foi possível determinar a frequência natural de vibração modificada, que corresponde àquela frequência de maior amplitude no espectro, e o decaimento exponencial. A figura 22 ilustra como o espectro melhora ao se fazer o espelhamento do sinal em relação ao eixo vertical.

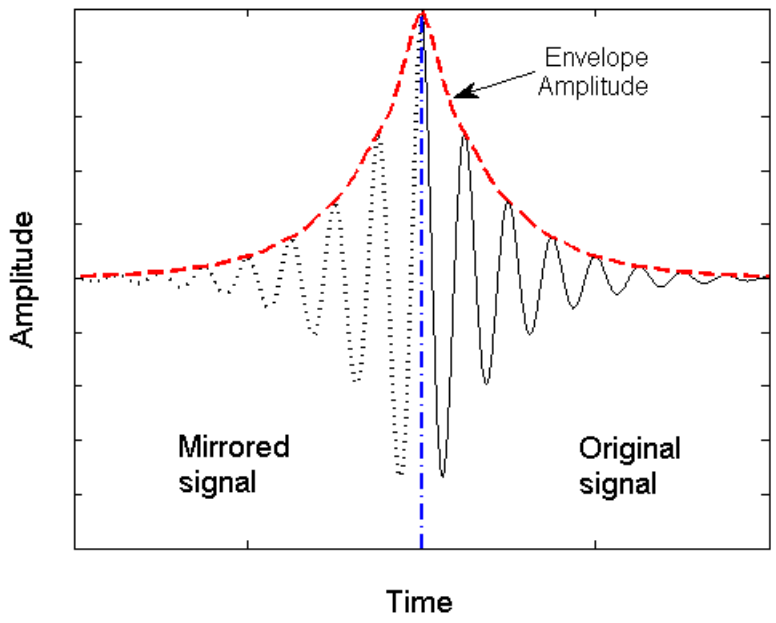


Figura 21 - Espelhamento do sinal

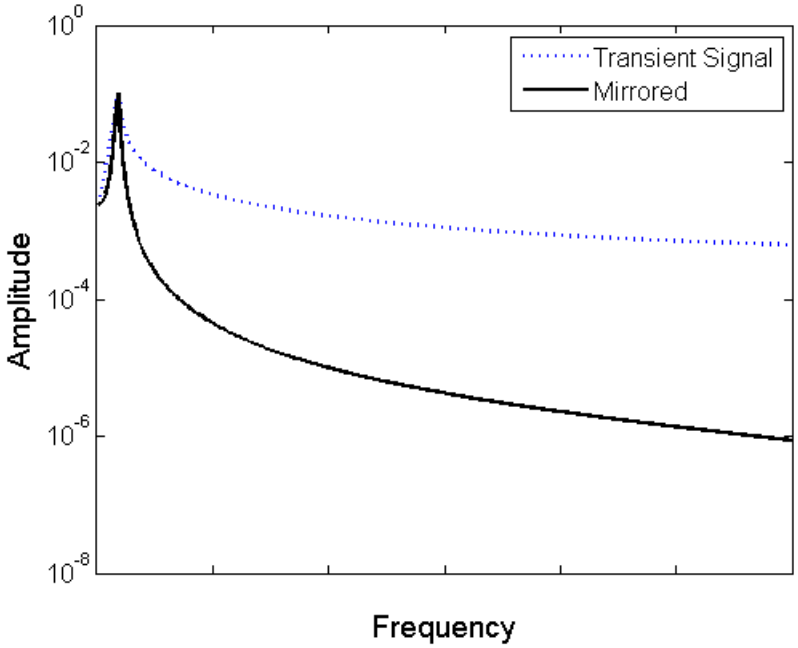


Figura 22 - Efeito causado pelo espelhamento do sinal

Na presença de um meio viscoso, no caso em um meio composto por glicerina, o sistema oscilatório comporta-se como um sistema subamortecido. Utilizando-se da função *Hilbert* no *Matlab* é possível extrair a amplitude do envelope do sinal. Nesse experimento, o "envelope" forneceu a informação sobre o decaimento exponencial de amplitude de vibração dos transdutores piezoelétricos, conforme ilustrado a Figura 23. É possível notar o decaimento do sinal para diferentes viscosidades. Vale ressaltar que quanto mais viscoso for um líquido, mais rápido é o decaimento, isso ocorre devido ao fato de que os transdutores experimentam maior amortecimento imposto pela viscosidade do fluido.

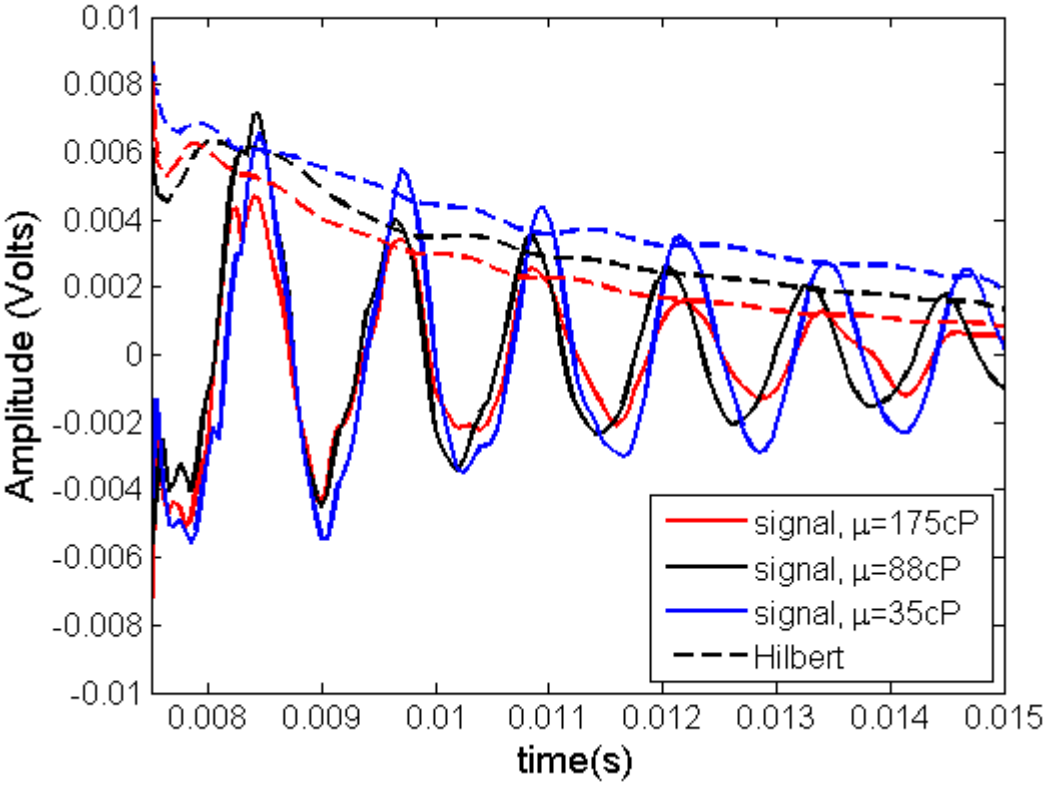


Figura 23- Decaimento do sinal para diferentes viscosidades assim como o envelopamento dessas curvas

Em seguida, afim de extrair o expoente da função exponencial dada pelo envelopamento anterior, foi plotada a curva, em escala logarítmica, da amplitude de vibração com o tempo. Esse expoente nos fornece o produto entre o coeficiente de amortecimento (ξ) e a frequência natural (ω_n) de oscilação do transdutor. Em casos com pequenas variações de densidade é possível correlacionar o fator de amortecimento com a viscosidade do fluido. A partir da Figura 23 é possível concluir que, para viscosidades mais elevadas, menor será o tempo de oscilação do transdutor piezoelétrico (dado pela inclinação das retas da Figura 24).

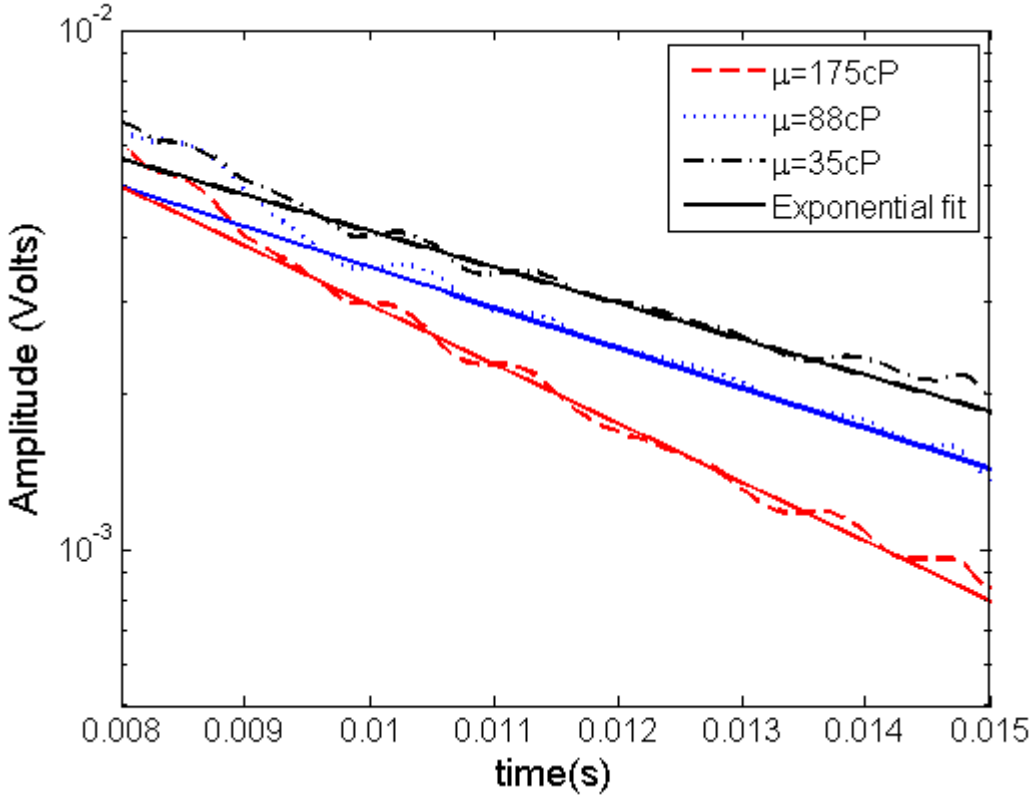


Figura 24 - Decaimento da amplitude para diferentes viscosidades

A Figura 25 representa o decaimento exponencial com a viscosidade medida com o viscosímetro. Os resultados mostram a viscosidade aumenta o decremento exponencial. No entanto, somente com esses resultados não é possível afirmar avaliar se a variação do decaimento exponencial é proveniente de mudanças na frequência natural ou no fator de amortecimento do dispositivo.

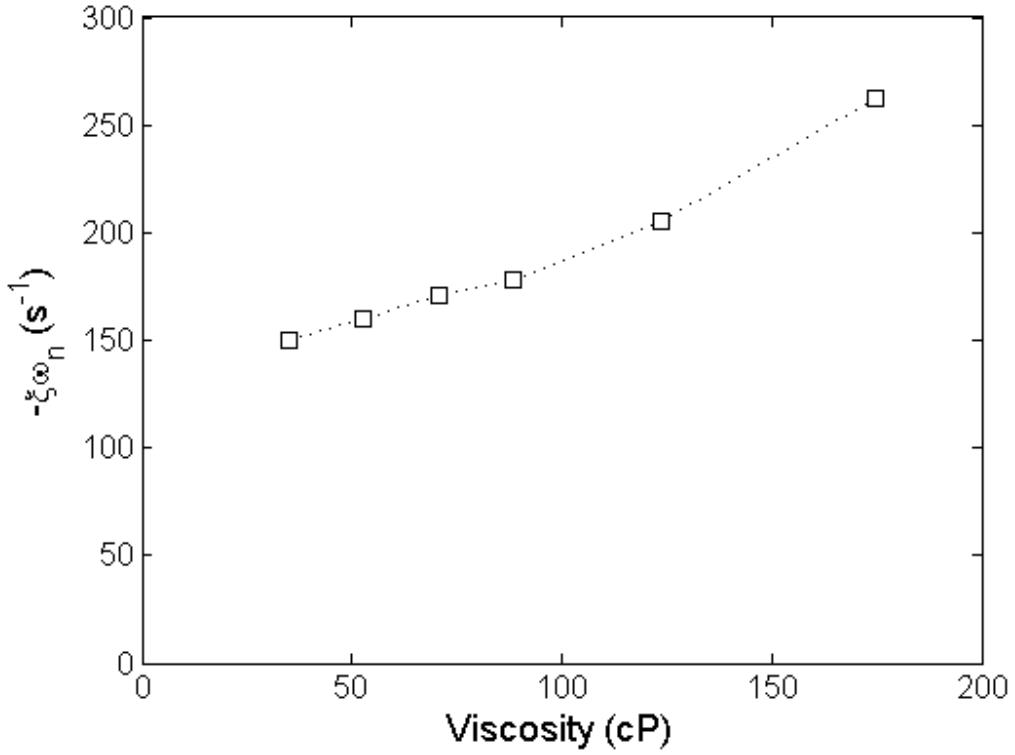


Figura 25 – Relação entre coeficiente de amortecimento e a frequência natural com a viscosidade

A Figura 26 fornece a relação entre a viscosidade da glicerina com a frequência de vibração natural e modificada. É possível notar que, na faixa de parâmetros analisada a frequência natural não apresenta variação significativa com a mudança da viscosidade. Já a frequência natural modificada, mostra uma maior variação devido a mudanças no fator de amortecimento. Logo, observa-se que as variações no decremento exponencial representam, basicamente, alterações no fator de amortecimento do sistema. Esses resultados, sugerem que o fator de amortecimento pode ser o parâmetro que deve ser avaliado no caso de monitoramento de degradação de óleos viscosos. No caso desses fluidos, a degradação induz grande variação de viscosidade e baixa alteração na densidade. Assim, os resultados apresentados na Figura 28, sugerem que o fator de amortecimento poderia ser utilizado, isoladamente, para calibrar o medidor com relação a mudança de viscosidade. No entanto, para que isso seja confirmado é necessário um estudo mais aprofundado sobe o dispositivo.

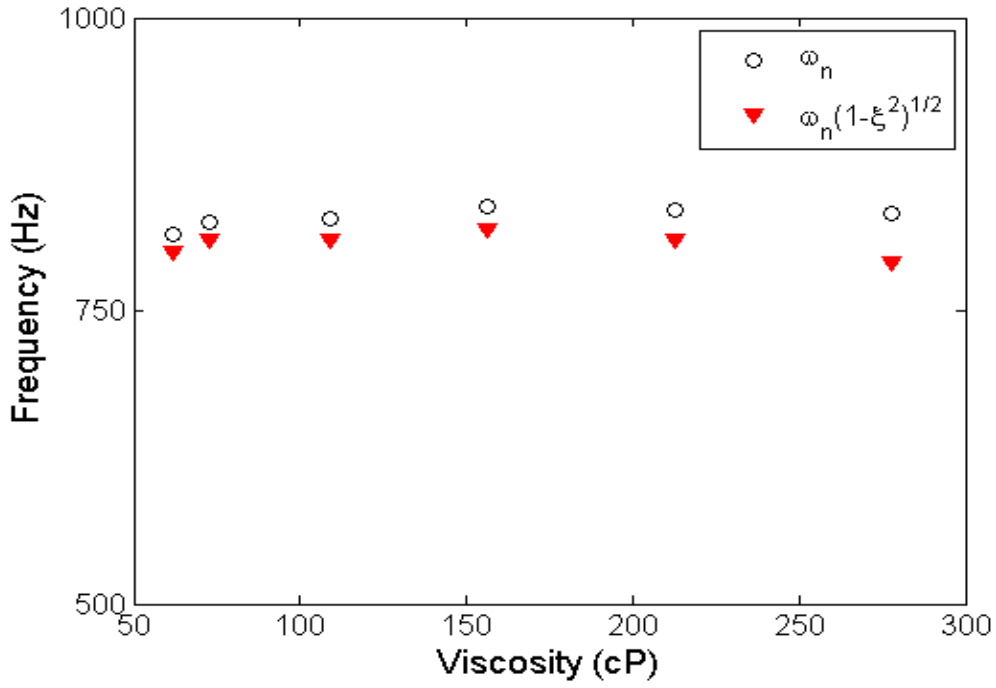


Figura 26 – Relação entre viscosidade e frequências de vibração

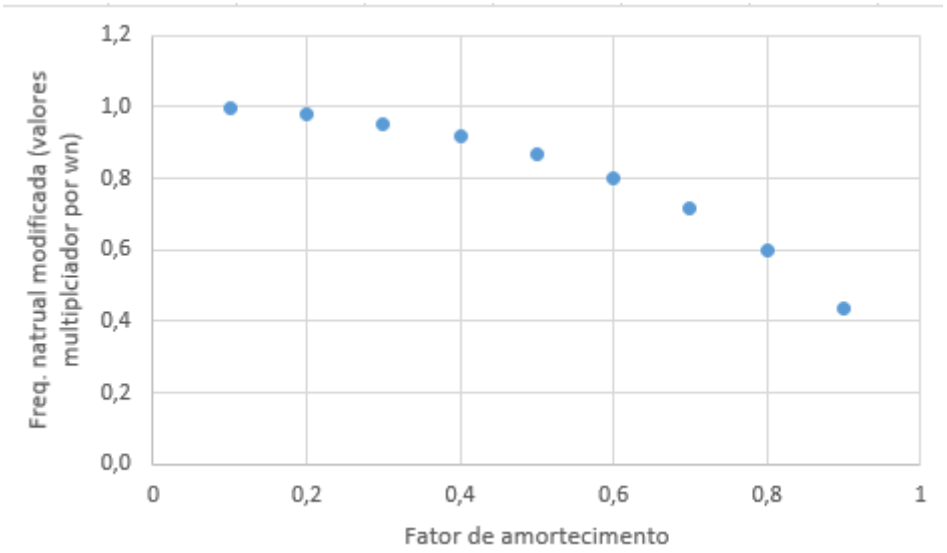


Figura 2711- Variação da freq. natural modificada com o fator de amortecimento

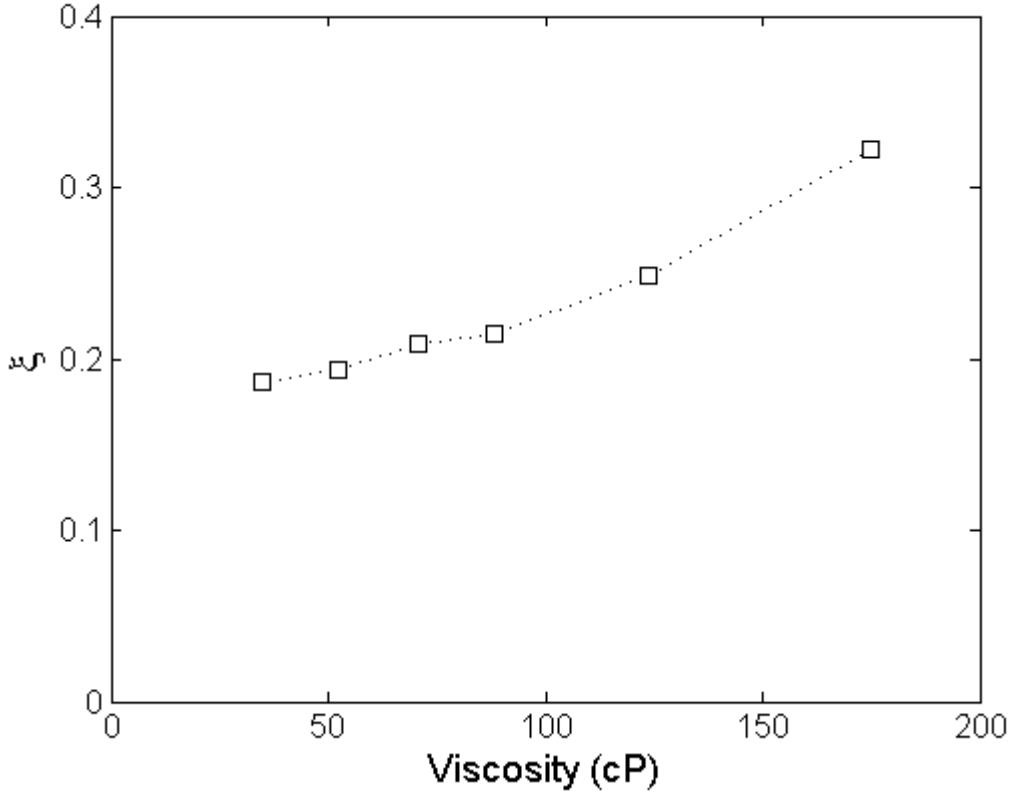


Figura 28 - Variação do fator de amortecimento com a viscosidade

Na figura 30 é possível ver a resposta do sensor imerso em fluidos com diferentes valores de densidades. Os fluidos utilizados nesses ensaios foram o álcool isopropílico, álcool isopropílico com açúcar, água destilada, água destilada com açúcar e clorofórmio, estando esses fluidos em ordem crescente de densidade. Esses fluidos apresentam valores de viscosidade baixas e similares, variando entre 0,5 e 1.5cP. Assim, a variação esperada para o fator de amortecimento é pequena. Dessa forma foi possível perceber que, para pequenos valores de densidade, o sensor apresenta uma maior variação da frequência natural de vibração. Porém, para valores relativamente mais elevados, é possível notar que a variação da frequência de vibração do sensor é menos evidente. Óleos automotivos

apresentam, em média, densidade na faixa de 0,8 a 0,9 g/m^3. Nessa faixa o sensor apresenta alta sensibilidade.

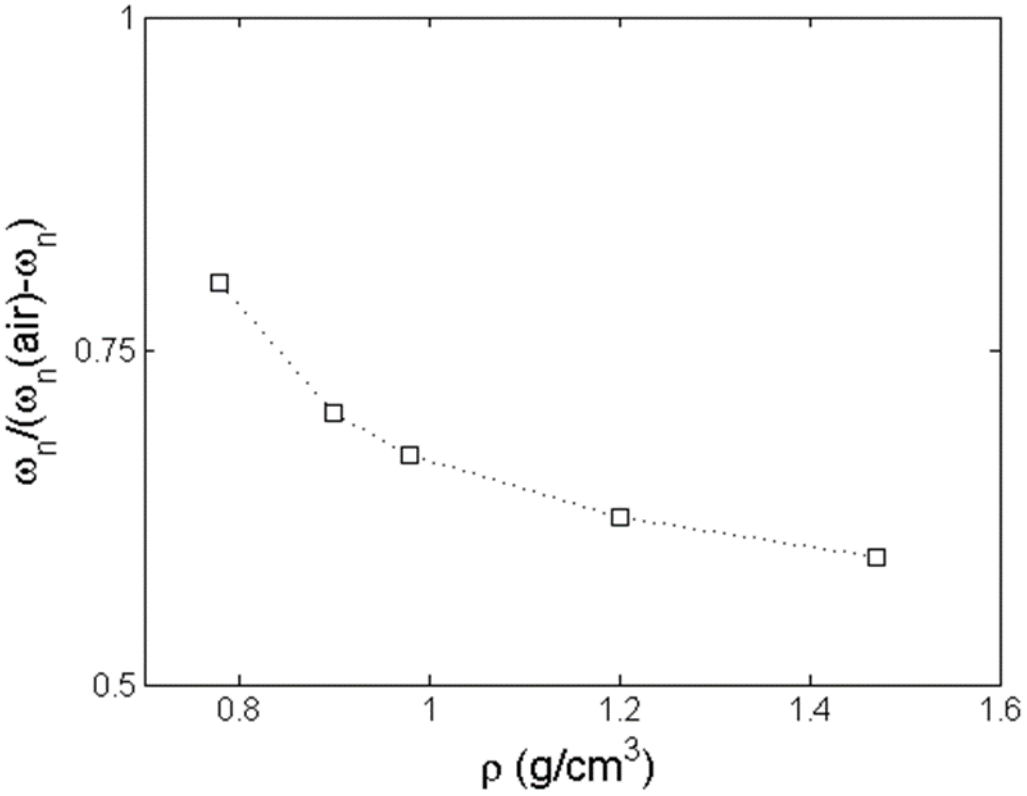


Figura 30 - Relação da frequência natural com a densidade

A variação da densidade pode causar alterações no fator de amortecimento do sensor uma vez que esse termo depende dos termos de amortecimento, de inércia e de rigidez (ver equação 18). Por isso, analisou-se na Figura 31 a variação do fator de amortecimento dividida pela frequência natural. De acordo com a equação 18, essa razão depende somente dos termos de amortecimento e rigidez do sistema. A figura 31, mostra que de fato esse termo não apresentou variação com a densidade. Os resultados apesar de promissores ainda demandam maiores investigações, pois para a calibração dos sensores para medição simultânea de densidade e viscosidade ainda é necessário avaliar a resposta do sistema com fluidos na mesma faixa desses parâmetros. Nos ensaios de variação de densidade, utilizou-

se com viscosidades abaixo da faixa de sensibilidade do sensor. É possível que na faixa de viscosidades dos óleos, os parâmetros dependentes da viscosidade e da densidade não possam ser desacoplados.

Estudos futuros também são necessários para se otimizar o dispositivo. Nesse trabalho, não foi realizada nenhuma investigação para aumentar a sensibilidade do equipamento. Isso é importante para redução na incerteza das medições.

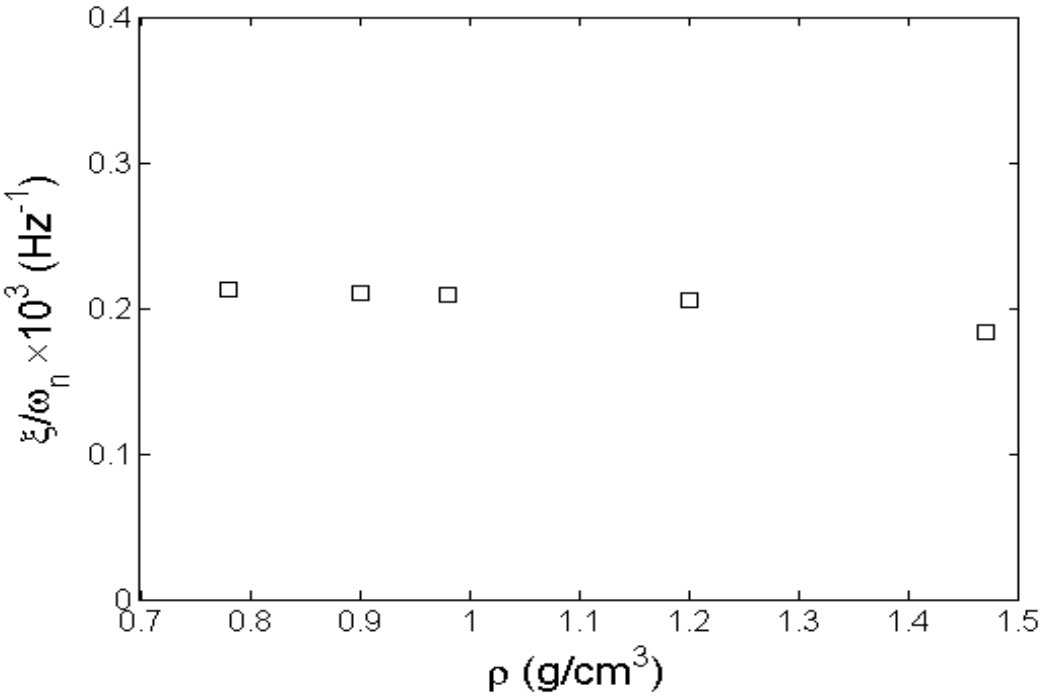


Figura 31 - Relação entre coeficiente de amortecimento e a frequência natural com a densidade

6. Conclusão

Neste trabalho foi estudado o funcionamento de instrumentos para medir densidade e viscosidade de fluidos, existentes no mercado, e como construir um sensor de baixo custo utilizando um transdutor piezoelétrico. A escolha de um transdutor piezoelétrico deu-se, sobretudo, pelo baixo custo de aquisição do transdutor, e também por ser utilizado em diversos tipos de sensoriamento de vibração, como é o caso do acelerômetro. Para a construção de um sensor de baixo custo, utilizando transdutor piezoelétrico, foi necessário estudar o comportamento deste quando imerso em líquidos e os conceitos de vibração. Para a utilização do sensor piezoelétrico, foi projetado um sistema de medição composto de hardware de aquisição e software de tratamento e análise das informações.

Foi aplicado um sinal de onda quadrada no primeiro transdutor piezoelétrico, que gerou em si uma vibração mecânica. Considerando que o segundo transdutor estava em contato com o primeiro, este recebeu por contato a vibração mecânica do primeiro transdutor piezoelétrico, e consequentemente, através de suas propriedades piezoelétricas, converteu a vibração mecânica em sinal elétrico. Assim, foi possível concluir que o sensor criado para esse experimento funciona conforme o conceito de amortecimento mecânico, onde a frequência de vibração é diferente devido à absorção de energia em contato com o líquido (o líquido provoca o amortecimento do sensor). A inércia, devido à carga de massa do líquido sobre o sensor, foi responsável pela mudança da frequência natural do sistema.

Como sugestão para futuros trabalhos, convém um aprofundamento nos estudos de sensoriamento afim de melhorar a sensibilidade do transdutor e entender melhor a influência na dimensão da área do material piezoelétrico na medição da frequência de vibração e na medição do fator de amortecimento do sensor, pois quanto maior for a área

do sensor, maior é a resistência mecânica, ou seja, o PZT que recebe a mesma alimentação se tiver uma estrutura maior irá vibrar menos que o PZT de estrutura menor. Pode-se concluir que, com o aumento da área, a frequência deve diminuir, o que interfere diretamente no resultado final. Outra sugestão é controlar a dilatação do metal do sensor piezoelétrico, pois essa dilatação pode interferir na frequência de vibração do sensor.

7. Referencias

[1] GODFREY, D. Clean, dry, oil prolongs life of lubricated machines. Lubrication Engineering, v. 45, p. 4-8, 1989.

[2] SNOOK, W. A. Análise de óleos usados de motores. **Lubrificação,** v.54, n.9, p.97-116, 1968.

[3] SNOWDEN JR, J.E.; WESTERHEID, J.P. Oil analysis as a significant factor in oil and equipment maintenance. Lubrication Engineering, v.32, p.425-432, 1976

[4] STEENBERGER, J.E. comprehensive lube oil analysis programs: A cost-effective preventive maintenance tool. Lubrication Engineering, v.34, p.625-628, 1978.

[5] DESQUIBES, G.; ORIVEL, M.; FRANCE, B.P. L`analyse des huiles au service de la maintenance des machines. SITMA LIAISON – Société des Engénieurs et Technicien du Machinisme Agricole, v. 25, p. 12-17, 1993.

[6] GASPARINI, C.T. Um modelo de laboratório econômico para análises de óleos lubrificantes. Revista da Associação dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, p. 38-42, 1983 a.

[7] ERICKSON, R. W.; TAYLOR JR, W. V. Rapid oil analysis. Lubrication, v.70, n.2, p.13-24. 1984.

[8] NEPOMUCENO, L.X. Manutenção preditiva em instalações industriais. São Paulo, Editora Edgard Blüncher, 1985.521 p.

[9] STAUFFER, R.D,; THOMPSON, J.L. Improved bench oxidation tests for railroad Diesel engine lubricants. Lubrication Engineering, v. 44, p. 416-423, 1988.

[10] BORIN, A. Aplicação de quimiometria e espectroscopia no infravermelho no controle de qualidade de lubrificantes. Campinas, 2003. 103p. Dissertação (Mestrado em Química Analítica). Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas,.

[11]http://www.lacarolamentos.com.br/catalogos/_SAIBA_MAIS/lubrificantes/lubri_auto.pdf acessado em 22/09/2016 as 20:43

[12] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Portaria ANP ntextordmasculine 129. Brasília, 1999.

[13] MENEZES, P. L.; NOSONOVSKY, M.; INGOLE, S. P.; KAILAS, S. V.; LOVELL, M. R. (Ed.). Tribology for Scientists and Engineers: From basics to advanced concepts. Nova York: Springer, 2013.

[14] KIMURA, R. K. **Uso da técnica de análise de óleo lubrificante em motores diesel estacionários, utilizando-se misturas de biodiesel e diferentes níveis de contaminação do lubrificante**. 129 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

[15] www.unicamp.br/fea/ortega/aulas/aula04_reologia.ppt acessado em 17/11/2016 as 17:00

[16] http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092442470500097X acessado em 11/12/2016 as 02:37

[17] PIETTE E, LENOIR J, REYCHLER H. The diagnostic limitations of ultrasonography in maxillofacial surgery. J Craniomaxillofac 1987; 15(6): 297-305

[18] IKEDA T., Fundamentals of piezoelectricity, New York Oxford, 1990

[19] Leo D.J.; “Engineering Analysis of Smart Material Systems”, John Wiley & Sons, 2007.

[20] JAFFE, B., COOK, W. R., JAFFE, H.; Piezoelectric Ceramics, 1a Ed, London & N.Y. Academic Press, 1971.

[21] CHANG, S.-M.; MURAMATSU, H.; NAKAMURA, C. & MIYAKE, J. **The principle and applications of piezoelectric crystal sensors** Materials Science and Engineering: C, 2000, 12, 111 – 123

[22] http://www.murata.com/en-us/products/sound/sounder/basic/mechanism acessado em em 15/11/2016 as 16:18

[23]http://www.atcp.com.br/imagens/produtos/ceramicas/artigos/Sensores_Teoria_e_Aplicacoes.pdf acessado em 15/11/2016 as 16:41

[24] HIROSHI MURAMATSU, EIICHI TAMIYA, I. K. **Computation of Equivalent Circuit Parameters of Quartz Crystals in Contact with Liquids and Study of Liquid Properties Analytical Chemistry,** 1988, 60, 2142 – 2146

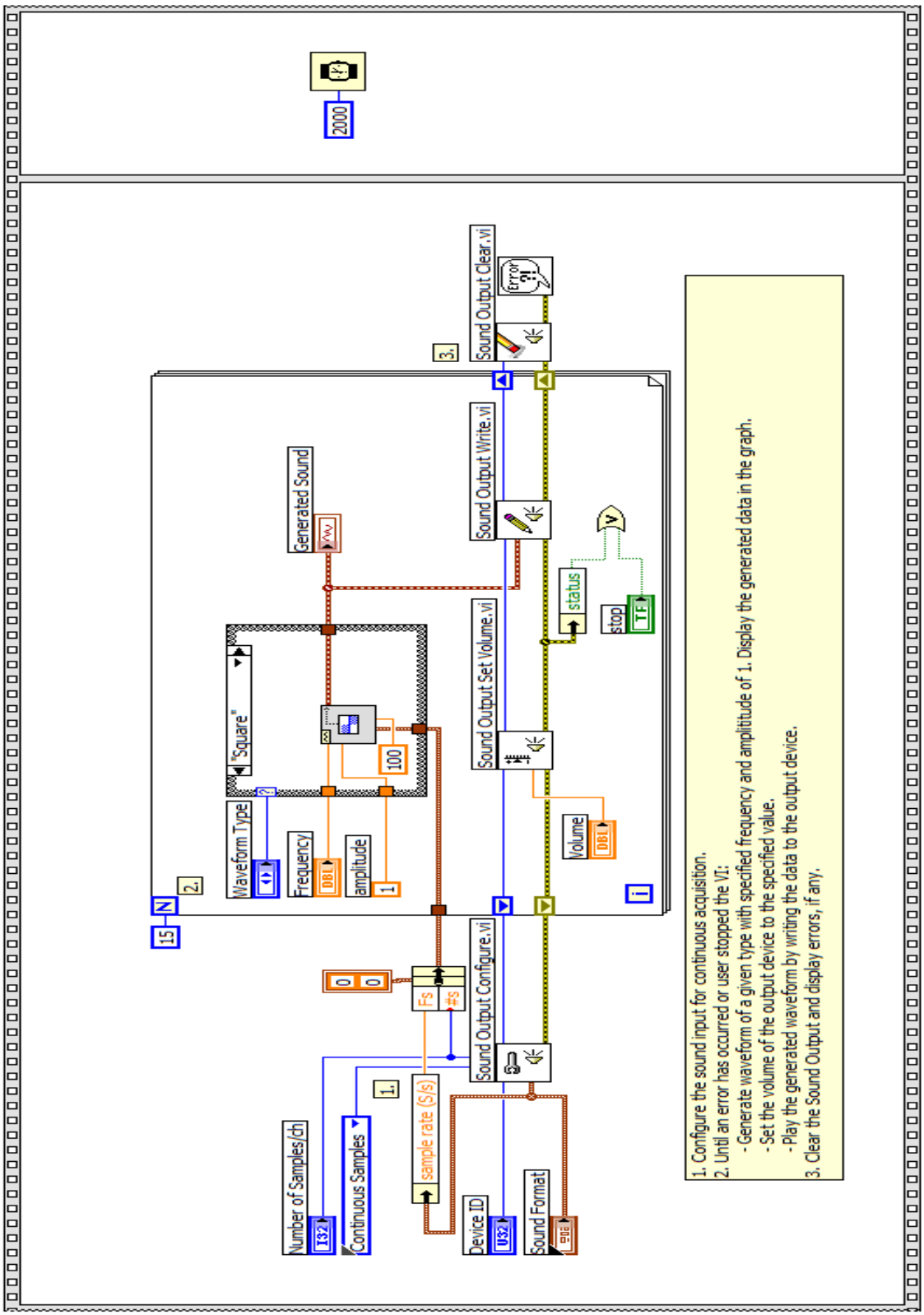
[25] http://www.aciscience.org/docs/physical_properties_of_glycerine_and_its_solutions.pdf acessado em 16/11/2016 as14:36

[26] http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/201987 acessado em 17/11/2016 as 17:00

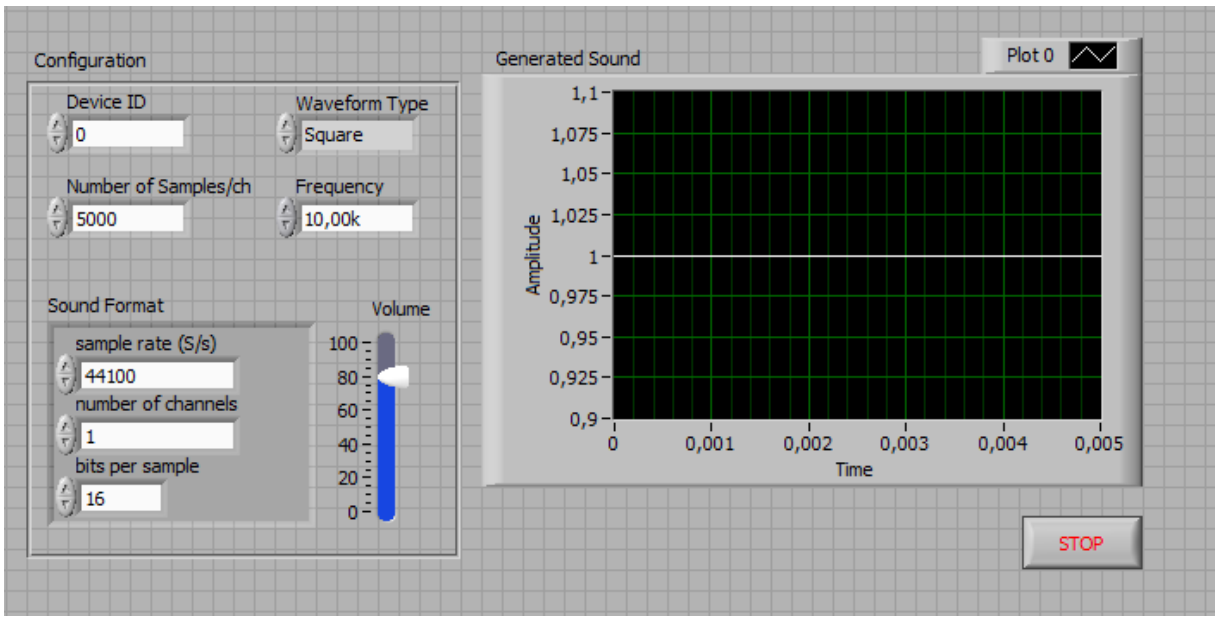
[27] http://lef.mec.puc-rio.br/wp-content/uploads/2015/03/aulas-redu%C3%A7%C3%A3o-de-ru%C3%ADdo.pdf acessado em 18/11/2016 as 17:55

8. ANEXOS

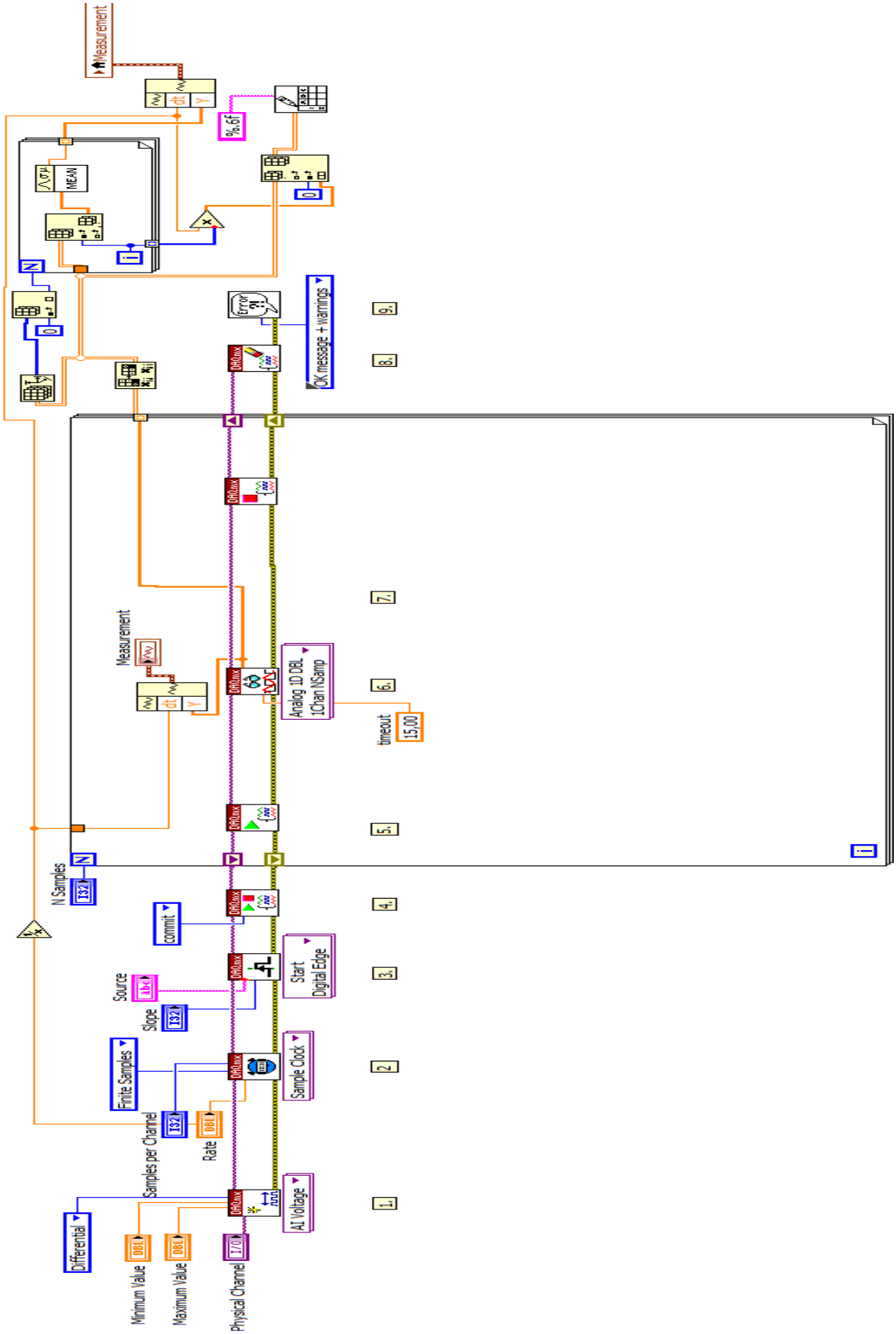
ANEXO 1 – Diagrama de blocos gerador de som



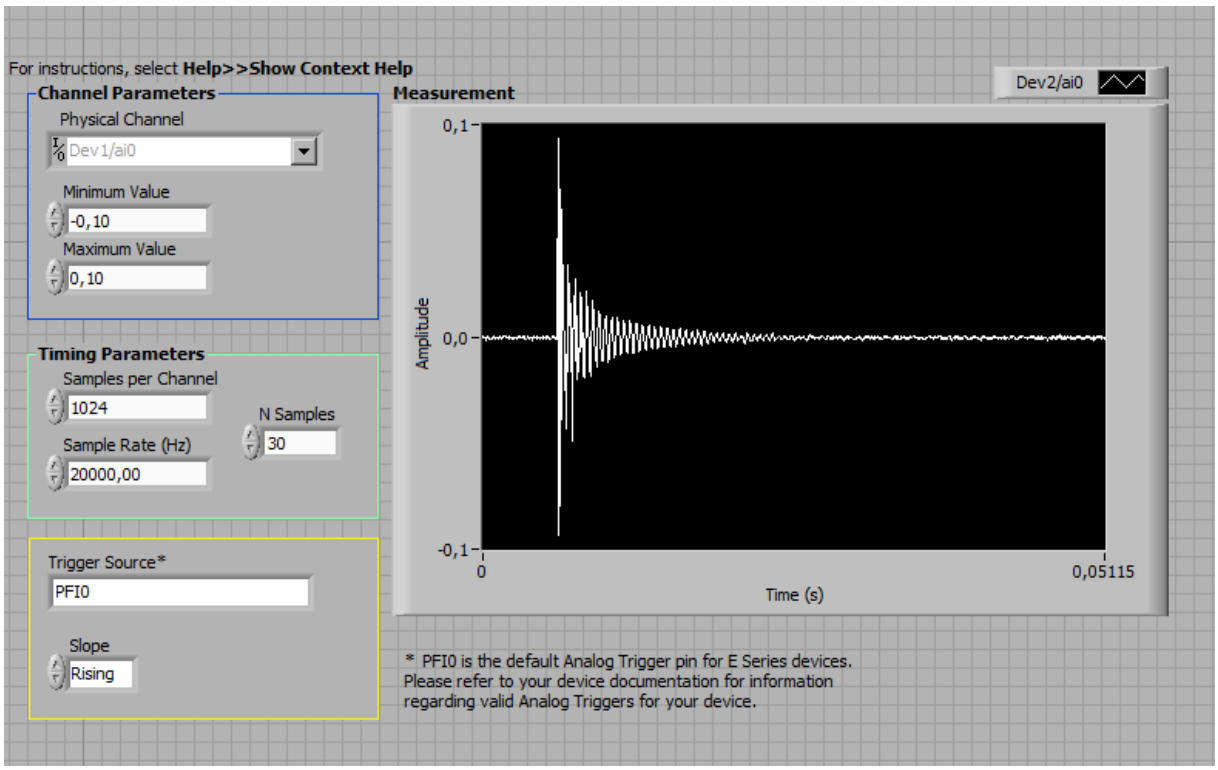
ANEXO 2 – Painel frontal do anexo 1



ANEXO 3 - Diagrama de blocos



ANEXO 4 – Painel frontal do anexo 3



ANEXO 5 – Programa Matlab

```
%*********************************************************************
%*********************************************************************
%   Program to process the data from the double disk visco-density meter
%   Ver. 01/10/2016 written by: I. B. de Paula
%*********************************************************************
%*********************************************************************

%********** Read Data ***********
clear
clc
clear signal spec signal_pad vibration hilb
[what,where]=uigetfile('*.dat','Dat File with stored data:');
disp(what);
old=pwd;
cd(where);
data=load(what);
cd(old);
time=data(:,1); % time vector
dt=mean(time(2:end)-time(1:end-1));
vibration=data(:,2:end); % matrix of sampled data
clear data; % clear memory
nsamples=length(time);
nfiles=length(vibration(1,:));

% 1st - measurement of mean signal
mean_sig=smooth(mean(vibration(:,:)'),100); %mean signal
```

```
n_skip=390; %number of initial skipped points
n_cut=n_skip+150; % last position analyzed in the data vector
n_analyze=n_cut-n_skip+1;

use_win=input('Use windowing? <0>n <1>');
if use_win==0
    win(1:nsamples)=1;
else
    win=hanning(nsamples,'periodic');
end

% 2nd - measurement of modified natural frequency
clear spec
for i=1:nfiles
    signal=(vibration(n_skip:n_cut,i)-mean_sig(n_skip:n_cut));
    spec(:,i)=fft(win(n_skip:n_cut).*(signal-mean(signal)));
    signal_pad(1:2*length(signal))=0;
    signal_pad(1:length(signal))=signal(1:end);
    hilb(:,i)=abs(hilbert(signal_pad-mean(signal)));
end
freq=(-n_analyze/2:n_analyze/2-1)*(1/(dt*n_analyze));
spec_m=fftshift(mean(abs(spec'))');


coeff_d=polyfit(time(n_skip+30:n_cut-
20),log(smooth(abs(mean((hilb(1+30:end/2-20,:))')),30)),1);
damp=coeff_d(1); % damping

[tmp,pos]=max(spec_m); % find the position of maximum amplitude in the
spectrum
wn_mod=abs(freq(pos)) % expected modified natural frequency from spectra
wn = wn_mod/(sqrt((damp^2)-1));

disp(['Modified Natural Frequency = ' num2str(round(wn_mod))]);
disp(['Damping ratio = ' num2str(round(damp))]);
disp(['Natural Frequency = ' num2str(round(wn))]);


figure
plot(time(n_skip:n_cut),smooth(abs(mean((hilb(1:end/2,:))')),30));
hold on
plot(time(n_skip:n_cut),exp(damp*time(n_skip:n_cut)+coeff_d(2)),'-
r','linewidth',2)
set(gca,'yscale','log')
xlabel('time(s)')

figure
plot(freq,abs(spec_m))
hold on
plot(freq(pos),abs(spec_m(pos)),'ob');
xlabel('Freq (Hz)')
```