MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

HIGRÔMETRO BASEADO EM RESPOSTA ACÚSTICA POR ELEMENTO EM COURO

por

Tiago Monteiro Lemos

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Julho de 2013

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

HIGRÔMETRO BASEADO EM RESPOSTA ACÚSTICA POR ELEMENTO EM COURO

por

Tiago Monteiro Lemos

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Co-orientador: Prof. Dr. Adalberto Schuck Jr.

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello

Prof. Dr. Sérgio Viçosa Möller

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 04 de Julho de 2013.

Dedicatória

Aos meus amores:

Jôni, Sandra,
Ricardo e Liana
pela força, compreensão,
companheirismo, fé e
amor, durante esta
longa caminhada.

Dedico-lhes esta
conquista com gratidão.

Agradecimentos

A Deus em primeiro lugar.

À Faculdade de Engenharia Mecânica da UFRGS.

Ao Emílio Roberto Armani pelos exemplos e ensinamentos de vida.

A todos os amigos que me deram suporte.

Aos bolsistas Mateus Utz e Guilherme Garber do laboratório LETA

Em especial, aos professores Paulo Schneider e Adalberto Schuck pela disseminação de conhecimentos que tornaram este trabalho possível.

LEMOS, T. M. **Higrômetro Baseado em Resposta Acústica por Elemento em Couro**. 2013. 17 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

Este estudo trata da construção de um medidor de umidade relativa do ar do tipo higrômetro, a partir de uma nova estrutura. Idealiza um medidor que utiliza um instrumento musical de percussão em que a frequência sonora emitida pela pele de couro é a propriedade que se altera quando se varia a umidade relativa do ar. É possível observar que o comportamento do couro varia quando o mesmo é exposto a diferentes condições de umidade. Ao provocar a vibração da membrana do couro, verifica-se a contração/expansão da pele através de sons agudos/graves, efeito este causado pela absorção ou eliminação da umidade. Após instrumentada, a membrana é calibrada com um medidor padrão de umidade relativa tendo seus dados comparados com o mesmo, avaliando sua incerteza de medição e acuracidade nos resultados. Os dados são obtidos através do *software Audacity*®, capaz de gravar o espectro do som emitido pelo instrumento. Para a leitura destes dados, faz-se uso do *software Matlab*®, que aplica a transformada de Fourier, transformando o espectro do som do domínio tempo em domínio frequência. Os resultados obtidos apresentam incertezas de medição entre 8.8 e 12.78%, quando comparado ao medidor calibrado de umidade relativa.

PALAVRAS-CHAVE: Higrômetro, frequência, umidade relativa do ar, couro.

LEMOS, T. M. ***Hygrometer Based on Acoustic Response Element by Leather Skin****. 2013. 17 pages. Monograph (Graduation Work in Mechanical Engineering) - Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.*

ABSTRACT

This study aims to build a meter relative humidity hygrometer type, from a new structure. Idealizes a meter that uses a percussion instrument in which the sound frequency emitted by the skin of leather is the property that changes when you vary the relative humidity. The behavior of the leather varies when it is exposed to different humidity conditions. By causing the vibration of the membrane of the leather, there is a contraction / expansion of the skin through treble / bass, an effect caused by absorption of moisture or disposal. Once instrumented, the leather membrane is calibrated with a standard meter, assessing their measurement uncertainty and accuracy in the results. The data are obtained through Audacity ® software, able to record the spectrum of the sound emitted by the instrument. To read this data, makes use of the Matlab ® software, applying the Fourier transform, which transforms the spectrum of the sound in the time domain frequency domain. The results obtained measurement uncertainties between 8.8 and 12.78% when compared to the meter calibrated humidity.

KEYWORDS*: Hygrometer, frequency, relative humidity, leather skin.*

SUMÁRIO

RESUMO v
ABSTRACT vi
LISTA DE FIGURAS viii
LISTA DE TABELAS ix
LISTA DE SÍMBOLOS x
1. INTRODUÇÃO 1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 2
3.1 O ALGORITMO DA FFT 3
3.2 VIBRAÇÃO EM UMA SUPERFÍCIE PLANA (KINSLER, 1962) 5
3.3 EQUAÇÃO DA ONDA PARA UMA MEMBRANA CIRCULAR (KINSLER, 1962) 6
4. METODOLOGIA 6
5. RESULTADOS 10
5.1 CALIBRAÇÃO 11
5.2 TESTE DE VALIDAÇÃO 12
6. CONCLUSÃO 13
REFERÊNCIAS 14
ANEXO(S) ou APÊNDICE(S) 15
APÊNDICE A 15
APÊNDICE B 16

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Operação de borboleta (DIF), FONTE: REIS (2008) 4
Figura 02: Grafico do algoritmo *radix-2* por decimação na frequência (DIF), FONTE: REIS (2008) 4
Figura 03: Intrumento acústico utilizado no experimento..... 6
Figura 04: Dispositivo do tipo higrômetro construido para acoplar à bancada de testes..... 7
Figura 05: Bancada com o dispositivo de medição acoplado 7
Figura 06: Gráfico de Amplitude x Tempo dos pulsos emitidos pela pele do couro no caso 1. 8
Figura 07: Gráfico do sinal gerado pelo caso 1, digitalizado no *domínio tempo* 9
Figura 08: Gráfico do sinal gerado pelo caso 1, digitalizado no *domínio frequência*..... 9
Figura 09: FFT da média dos pulsos, no exemplo: Caso 1 10
Figura 10: Gráfico de calibração UR x Frequência..... 12

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Combinações de temperatura e umidade do ar empregadas nos ensaios do higrômetro acústico..... 8
Tabela 02: Sequência de ensaios com 2 níveis de temperatura e diferentes conteúdos de umidade..... 11
Tabela 03: Sequência de ensaios com 3 níveis de temperatura do ar e conteúdo de umidade constante..... 11
Tabela 04: Comportamento da umidade relativa calculada para amostras aleatórias de conteúdo de umidade e temperatura 13

LISTA DE SÍMBOLOS

c	Velocidade do som	$[m/s]$
f	Frequência	$[Hz]$
θ	Ângulo de fase	$[rad]$
r	Raio	$[m]$
σ	Densidade de área	$[kg/m^2]$
τ	Tensão de estiramento	$[N/m]$
T	Temperatura	$[°C]$
UR	Umidade relativa do ar	$[\%]$
w	Conteúdo de umidade do ar	$[g/kg]$

1. INTRODUÇÃO

A umidade relativa é a relação entre a quantidade de vapor d'água existente no ar (umidade absoluta) e a quantidade máxima que poderia haver na mesma temperatura (ponto de saturação) (BELL, 1996). Esta medida é um indicador muito utilizado na meteorologia, pois permite prever o comportamento do tempo e do clima.

A umidade tem influência nos processos químicos, físicos e biológicos, que relacionam diversos tipos de efeitos explorados para a indicação das variações de umidade (DIAS, 2001). Dentre os métodos mais conhecidos de medição da umidade estão: Higrômetros mecânicos, psicrômetros de bulbo seco e úmido, medidores por impedância elétrica, sensores capacitivos e resistivos, higrômetros por condensação, higrômetros espectroscópicos, entre outros.

A proposta do presente trabalho é a construção de um instrumento acústico capaz de medir a umidade relativa do ar baseado em uma resposta acústica. Outra motivação deve-se ao fato de ser este, possívelmente, um estudo original, o que torna a pesquisa ainda mais desafiadora.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A quantificação da umidade do ar pode ser feita por vários tipos de instrumentos: os psicrômetros, que utilizam as leituras de um termômetro de bulbo seco e a de um bulbo úmido, e os higrômetros, que utilizam a medida da variação de uma propriedade física de um material, como a alteração de suas dimensões (cabelo humano ou crina de animais), a capacitância elétrica (capacitor), entre outros. O uso da diferença entre a temperatura do ar e a temperatura de um sensor recoberto por uma superfície evaporante para a quantificação da umidade de ar foi relatada pela primeira vez em meados do século 18 (BINDON, 1965), de forma que o psicrômetro é o mais antigo instrumento utilizado para determinação do conteúdo do vapor d’água da atmosfera (FRITSCHEN & GAY, 1979). Segundo White e Ross (1991), ele segue sendo o método mais prático e conhecido para a medição da umidade do ar, além de permitir bom nível de precisão nas medidas (GUYOT, 1999).

Caliendo et al. (1993) desenvolveu e testou um novo sensor acústico com uma membrana de Polifenilacetileno, com o auxílio de um substrato piezoelétrico conectado a um amplificador, que controla a ocilação das ondas acústicas através da frequência e velocidade de propagação. Os resultados experimentais obtidos mostram alta sensibilidade da membrana quando submetida a variação, em larga escala, de umidade relativa, e uma rápida resposta no tempo.

Baseado no mesmo método, Lin et al. (2012) investigou o comportamento de um polimero composto de nanofibras de polianilina em conjunto com um ressonador de frequência, exposto a um ambiente com variação de umidade relativa em uma sala com temperatura controlada. O sensor de nanofibra apresentou alta sensibilidade à variação de umidade relativa e uma rápida resposta no tempo quando umidificado e desumidificado, comparado à higrômetros comercialmente calibrados. Este sensor também detectou umidades abaixo de 0.5%.

Os estudos acima apresentam métodos similares para obtenção dos dados de umidade relativa do ar. No entanto, utilizam de elementos eletrônicos como ressonadores de frequência, sensores, substratos piezoelétricos, para aquisição dos dados.

O trabalho ora apresentado traz uma alternativa nova para a higrometria acústica, pois faz uso de uma sistemática simples para geração, leitura e obtenção dos dados. Um sensor de umidade tendo o couro como elemento higroscópico é excitado por um impulso mecânico, e a frequência emitida é captada por um microfone acoplado a um computador para a aquisição e tratamento de dados por meio de transformadas de Fourier para identificar a frequência fundamental.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A análise de Fourier constitui a base para a maioria dos processamentos de sinal digital. A transformada de Fourier (FT) e sua família de membros permite que um sinal no domínio tempo seja convertido em uma representação equivalente no domínio frequência. Por outro lado, se a resposta de um sinal de frequência é conhecida, a transformada de Fourier inversa (TFI) permite que o sinal no domínio tempo correspondente seja determinado. (KESTER)

Em casos práticos, a avaliação da FT não é feita analiticamente, pois frequentemente não se dispõe de uma expressão para a função que se deseja analisar o espectro obtido através de uma fonte emissora. Para contornar essa dificuldade, emprega-se a Transformada Discreta de Fourier (DFT), com o auxílio de *softwares* computacionais. A FT decompõe um sinal em suas componentes elementares seno e cosseno. Quando aplicada a um espectro de som, gera informações no domínio frequência, em que cada ponto representa uma dada frequência contida no domínio espacial do espectro analisado. A FT representa a soma de uma série de formas de onda senoidais com diferentes amplitudes, fase e frequência, sendo aplicável quando se deseja conhecer a frequência em um determinado padrão.

Discretizando um sinal em *N* amostras no domínio tempo, definidos como $f(k)$, *onde* $k = 0,1,2,...,N-1$, a DFT é constituida pelo conjunto destas *N* amostras do sinal no domínio

frequência, definido por $F(n)$, *onde n = 0,1,2,...,N-1*. Então, a transformada de $f(k)$ é definida por:

$$F(n) = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} f(k)e^{-j2\pi kn/N} \tag{3.1}$$

Diz-se então que $f(k) - F(n)$ formam um par transformada e a reobtenção do sinal no domínio temporal pode ser feita usando a transformada inversa discreta de Fourier:

$$f(k) = \sum_{n=0}^{N-1} F(n)e^{j2\pi kn/N} \tag{3.2}$$

Um aumento na quantidade de amostras *N*, implica diretamente em uma melhor representação do espectro.

A revolução do tratamento de sinal digital ocorreu com a publicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) (COOLEY;TURKEY, 1965), que reagrupa os cálculos dos coeficientes de uma DFT com alta eficiência, rapidez e qualidade de resposta. A ideia básica é dividir a DFT em transformadas menores recursivamente, afim de diminuir esforço computacional.

O número de operações realizadas no cálculo da DFT através da definição é proporcional à N^2. Para cada *N* valores de *u*, a expansão de $f(u)$ requer *N* multiplicações complexas de $f(x)$ por W^{ux}, além de *(n-1)* adições dos resultados, como mostra a função a seguir:

$$F(u) = \frac{1}{N}\sum_{X=0}^{N-1} f(x)W_N^{ux} \tag{3.3}$$

Decomposições apropriadas tornam o número de multiplicações e adições proporcionais à $N\log_2 N$.

3.1 O ALGORITMO DA FFT

Existem diversos algoritmos para o cálculo da FFT, entre eles, o *radix-2.*

O algoritmo de Cooley e Turkey (1965) necessita que *N* seja potência de 2. Este algoritmo pode ser aplicado no domínio tempo, chamado de DIT (*decimation-in-time*), e no domínio frequência, chamado de DIF (*decimation-in-frequency*).

Aplicando o algoritmo da FFT em uma transformada discreta, temos uma operação que consiste de uma multiplicação complexa e duas somas complexas, chamada de “bolboleta”, mostrada na Figura 01.

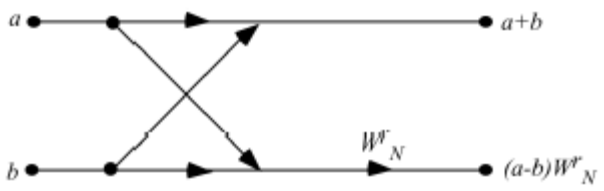

Figura 01: Operação de borboleta (DIF), FONTE: REIS (2008)

Para aplicar o algoritmo de decimação na frequência, os valores de entrada apresentam a série na ordem normal, mas seu resultado é ordenado em bit-invertido. Os resultados precisam ser rearranjados para a ordem bit-invertido de índices, onde os elementos são separados em dois grupos de acordo com o bit menos significativo na primeira separação, com o segundo bit menos significativo na segunda separação, e assim sucessivamente.

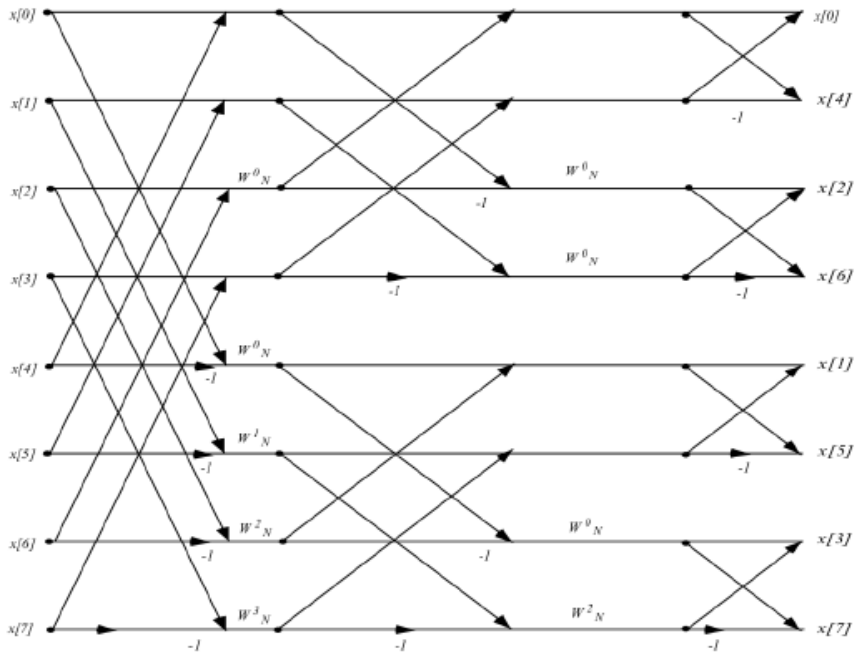

Figura 02: Grafico do algoritmo *radix-2* por decimação na frequência (DIF), FONTE: REIS (2008)

Esses algoritmos aplicam um total de $(N/2)\log_2 N$ operações de borboleta, totalizando $(N/2)\log_2 N$ multiplicações complexas e $N\log_2 N$ somas complexas, o que em termos de esforço computacional significa uma complexidade de ordem O($N\log_2 N$).

Os algoritmos *radix-2* podem ser estendidos para *radix-4, radix-8, radix-16*, que melhoram o desempenho por necessitarem de menos etapas e menos operações de borboleta por etapa, porém necessitam que o tamanho das séries sejam potências de 4, 8, 16, respectivamente.

3.2 VIBRAÇÃO EM UMA SUPERFÍCIE PLANA (KINSLER, 1962)

Para determinar a vibração em uma superfície plana como a membrana do tambor, objeto deste experimento, considera-se a superfície estirada em duas dimensões. Analises detalhadas serão restritas a dois sistemas:

- O estiramento uniforme em uma membrana circular, onde a espessura da membrana é desprezível;
- Uma fina membrana, onde a espessura é o fator relevante.

O deslocamento *y* de um ponto é expresso em coordenadas cartesianas na forma:

$$y = y(x, z, t) \tag{3.4}$$

Assume-se uma membrana fina e uniforme, de espessura desprezível, perfeitamente elástica, com pequenos deslocamentos de amplitude. Para esta membrana, considera-se um elemento retangular de área $dS = dxdz$, σ como a densidade de área da membrana e τ como a tensão da estiramento da membrana. A tensão no elemento $dxdz$ devido ao par de tensões τdz é:

$$\tau dz\left[\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_{x+dz} - \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_{x}\right] = \tau \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dxdz \tag{3.5}$$

E este devido ao par de tensões τdx é $\tau(\partial^2 y / \partial z^2)dxdz$. Equacionando a soma destes dois termos ao produto da massa $\sigma dxdz$ pela sua aceleração $\partial^2 y / \partial t^2$, tem-se:

$$\tau\left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 y}{\partial z^2}\right)dxdz = \sigma dxdz \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \tag{3.6}$$

Reescrevendo a equação 3.6 em função da velocidade c , tem-se:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2\left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 y}{\partial z^2}\right) \tag{3.7}$$

Onde

$$c = \sqrt{\tau / \sigma} \tag{3.8}$$

Nesta equação percebe-se que a velocidade de propagação do som está diretamente ligada ao quadrado da tensão do estiramento pela massa da membrana.

3.3 EQUAÇÃO DA ONDA PARA UMA MEMBRANA CIRCULAR (KINSLER, 1962)

A equação geral para uma membrana circular, considerando qualquer sistema de coordenadas é dado em coordenadas polares por:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 y \quad \text{ou} \quad \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 y}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial y}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 y}{\partial \theta^2}\right) \tag{3.9}$$

A membrana circular é a aproximação mais apropriada para o estudo das vibrações em ondas transversais, pois vibra simetricamente, tornando-se independente da coordenada θ. Neste caso simplificado, tem-se:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 y}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial y}{\partial r}\right) \tag{3.10}$$

4. METODOLOGIA

A partir da junção dos conhecimentos adquiridos durante o curso de engenharia mecânica e de conhecimentos sobre música, é construído um higrômetro capaz de realizar a medição da umidade relativa do ar através da frequência sonora emitida por um instrumento de percussão. Os detalhes dos materiais utilizados estão descritos no Apêndice A.

O instrumento é do tipo Gaixeta, composto por um corpo de polímero, um arco de alumínio, 6 hastes roscadas que possibilitam a afinação do instrumento e uma pele de couro, como mostra a figura a seguir:

Figura 03: Intrumento acústico utilizado no experimento

Para conduzir o fluxo de ar à membrana, é construido um dispositivo com materiais recicláveis. Nas extremidades, foram posicionadas duas luvas de PVC destinadas a entrada e saída de ar:

Figura 04: Dispositivo do tipo higrômetro construido para acoplar à bancada de testes

A bancada de testes é instrumentada com um ventilador, um aquecedor com dimerizador, um vaporizador de ar ou umidificador, um instrumento calibrado e 3 termopares intercalados entre a entrada, aquecedor e umidificador. Nesta disposição, será possível controlar a temperatura após cada intervenção no fluxo, seja ela por temperatura ou por conteúdo de umidade. A figura 05 mostra a posição de cada componente citado:

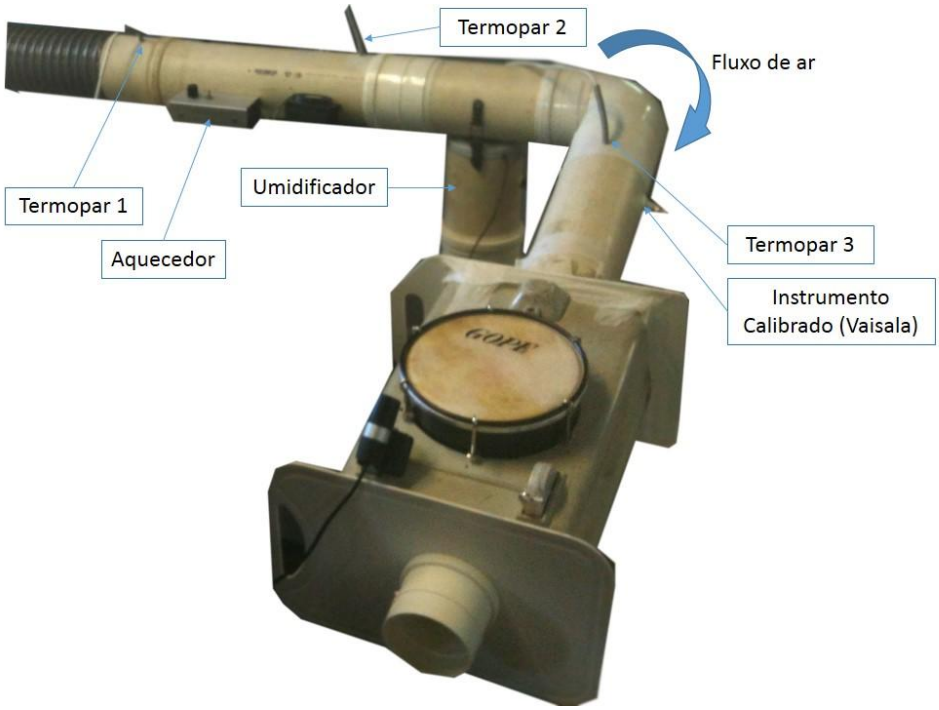

Figura 05: Bancada com o dispositivo de medição acoplado

Com o medidor acoplado à bancada, mantém-se a corrente de ar em 5 m/s. O fluxo de ar entra em contrato com a pele de couro umidificando-a ou ressecando-a. À medida que a pele absorve umidade, a tensão baixa pois as fibras do couro absorvem moléculas de água, deixando-a mais pesada, resultando num aumento de sua massa. Este efeito reflete

diretamente na sonoridade do instrumento, apresentando som mais grave e, portanto, reproduzindo baixas frequências. O efeito contrário é causado com a eliminação destas moléculas de água quando se diminui o conteúdo de umidade do meio, tensionando a pele. Este efeito aumenta a frequência sonora, produzindo sons mais agudos.

O mesmo ocorre para a variação da temperatura. Ao aquecer o fluido que escoa no interior da tubulação, tem-se o tensionamento da pele. O efeito contrário é verdadeiro quando diminuimos a temperatura do fluido.

A bancada descrita na figura anterior permitiu a realização de ensaios com diferentes temperaturas e conteúdos de umidade do ar organizados e obtidos da seguinte forma:

- Variação da temperatura mantendo o conteúdo de umidade ambiente constante;
- Variação do conteúdo de umidade mantendo a temperatura ambiente constante.

É proposto 6 combinações de ensaios descritas na tabela a seguir:

Tabela 01: Combinações de temperatura e conteúdo de umidade do ar empregadas nos ensaios do higrômetro acústico

CASO	TEMPERATURA	CONTEÚDO DE UMIDADE
1	Ambiente	Ambiente
2		50% da potência do umidificador
3		100% da potência do umidificador
4	Ambiente	Ambiente
5	50% da potência do aquecedor	
6	100% da potência do aquecedor	

Para cada caso são obtidos 30 pulsos dos quais 5 são utilizados para análise pelo método do Periodograma, que consiste na detecção de periodicidade em séries temporais.

O pulso adquirido através do *software Audacity*® (http://audacity.sourceforge.net/), tem formato conforme figura abaixo:

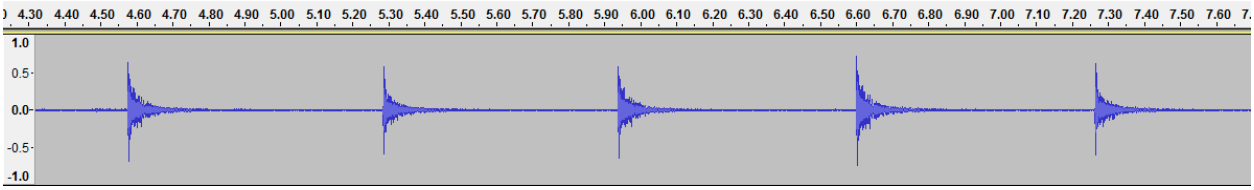

Figura 06: Gráfico de Amplitude x Tempo dos pulsos emitidos pela pele do couro no caso 1

Através deste sinal analógico, gera-se um arquivo de áudio em extensão *.WAV* de cada pulso, separadamente.

Para analisar a frequência emitida pelo instrumento, faz-se o uso da função *waveread* do *software Matlab*® (http://www.mathworks.com/), descrita no Apêndice B, que transforma um sinal analógico em digital através de alguns pontos, chamados amostragem. No presente experimento, a taxa de amostragem utilizada para gravar o som analógico foi de 800.000 kHz, o que significa armazenar 800.000 amostras por segundo. Quanto maior a taxa de amostragem de um sinal analógico, melhor será a sua representação no sinal digital. No entanto, para o sinal digital, utilizou-se uma amostragem de 32.768 kHz.

A Figura 07 mostra o sinal digital correspondente aos pulsos:

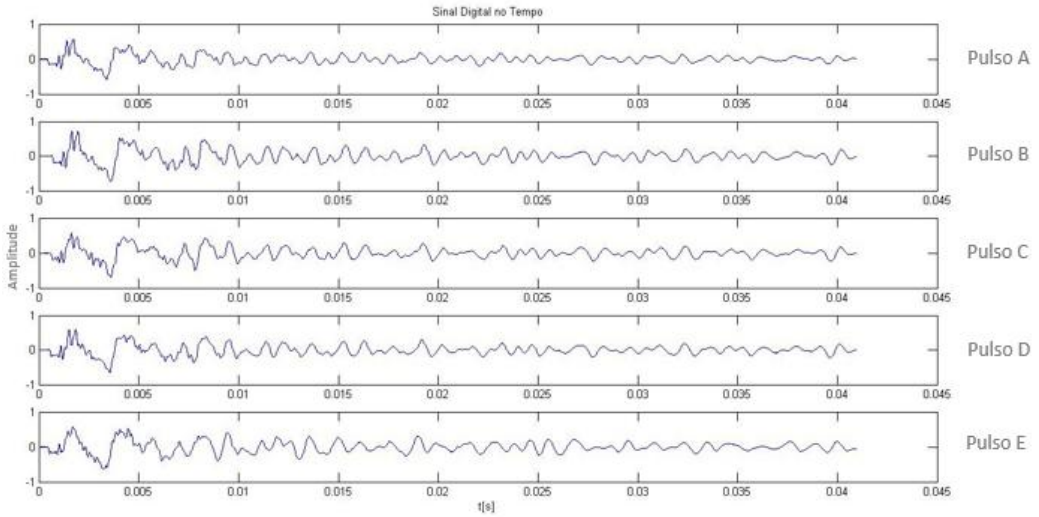

Figura 07: Gráfico do sinal gerado pelo caso 1, digitalizado no domínio tempo

Para transformar o domínio tempo em frequência, aplica-se a FFT em cada pulso, como pode ser visto na Figura 08:

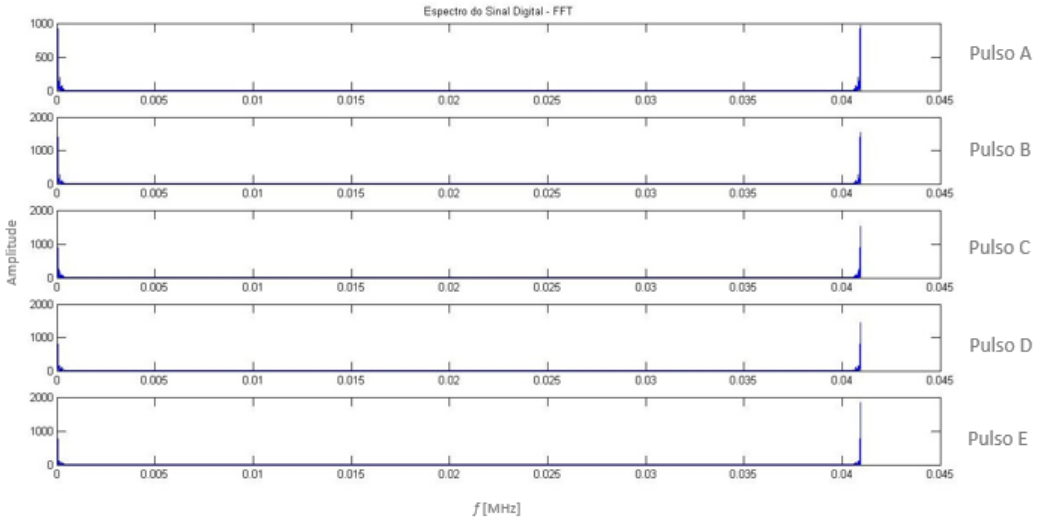

Figura 08: Gráfico do sinal gerado pelo caso 1, digitalizado no domínio frequência

Assim, faz-se a média dos pulsos e divide-se a amostragem em *n* partes, afim de obter uma melhor resolução, como mostrado a seguir:

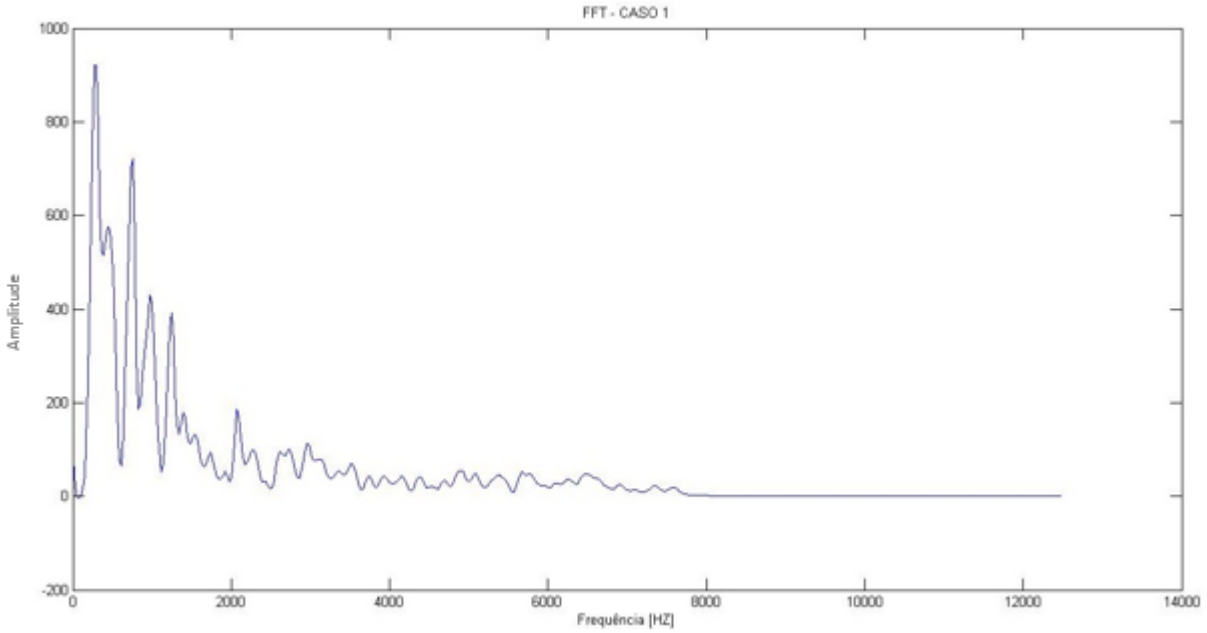

Figura 09: FFT da média dos pulsos, no exemplo: Caso 1

A frequência fundamental emitida pelo instrumento encontra-se no primeiro pico da Figura 09. Na sequência, encontram-se suas harmônicas.

A identificação da frequência fundamental emitida é feita através das funções de Bessel, onde relaciona-se com seus harmônicos pelas equações abaixo:

$$\begin{aligned} f_2 &= 2.295\, f_1 \\ f_3 &= 3.589\, f_1 \\ f_4 &= 4.90\, f_1 \\ &etc. \end{aligned} \tag{4.1}$$

A frequência fundamental, dada por f_1 é utilizada como o principal parâmetro para este experimento.

5. RESULTADOS

Os dados obtidos no higrômetro acústico (HA) foram comparados com o sensor multicanais Vaisala, o qual apresenta uma incerteza de medição de ±0,2% para temperaturas que variam entre -40 e +60°C e ±1,5% para umidade relativa, *UR*, para mesma faixa de temperatura.

5.1 CALIBRAÇÃO

Para o primeiro arranjo de dados manteve-se a temperatura T fixa em 2 níveis e variou-se o conteúdo de umidade w. A próxima tabela mostra os valores medidos de frequência, juntamente com a umidade relativa UR_{ref} medida no sensor de referência.

Tabela 02: Sequência de ensaios com 2 níveis de temperatura e diferentes conteúdos de umidade

CASO	$T[°C]$	$w[g/kg]$	$UR_{ref}[\%]$	$f[Hz]$
1	*23.1*	10.75	60.2	286
2	*23.5*	13.25	73.2	220
3	*23.8*	16	84.7	195.5
6	*40.9*	11	23.2	415
5	*41.2*	12.5	26.6	390.5
4	*41.2*	16	32.6	341.8

A variação do conteúdo de umidade do ar foi percebida pela variação da frequência de forma significativa. Quanto maior o valor de w, maior a densidade de massa da membrana σ através da absorção de partículas de água do ar, o que reduz a velocidade de propagação da onda c (Equação 3.8). Para o segundo arranjo de dados manteve-se w constante e variou-se a temperatura em 3 níveis, como mostra a tabela a seguir:

Tabela 03: Sequência de ensaios com 3 níveis de temperatura do ar e conteúdo de umidade constante

CASO	$w[g/kg]$	$T[°C]$	$UR_{ref}[\%]$	$f[Hz]$
1	*10.75*	23.1	60.2	286
6	*10.75*	40.9	23.2	415
7	*10.75*	56.2	11.2	488.3
2	*13.25*	23.5	73.2	220
5	*13.25*	41.2	26.6	390.5
3	*15.75*	23.8	84.7	195.5
4	*15.75*	41.2	32.6	341.8

Esta opção mostra que a variação da temperatura também tem influência no comportamento da membrana e, consequentemente, na umidade relativa. Aumentando-se a temperatura, tem-se uma elevação da frequência emitida pelo instrumento causada pelo ressecamento e tensionamento da pele de couro. O ressecamento reduz σ e aumenta τ, consequentemente, temos um aumento da velocidade do ar c, reproduzindo ondas sonoras mais agudas, ou seja, de maior frequência.

A curva de calibração do instrumento e a equação correspondente foi baseada nos 2 arranjos acima citados, válida para intervalos de frequência $f(190 \leftrightarrow 500)Hz$ e umidade relativa do ar $UR(10 \leftrightarrow 90)\%$, com um coeficiente de correlação de 99.45%, resultando em uma equação polinomial de 4° grau, como segue:

$$UR = a + bf + cf^2 + df^3 + ef^4 \qquad (5.1)$$

Onde:

$a = -1.22e^{-2}$

$b = 1.58$

$c = -8.88e^{-3}$

$d = 1.73e^{-5}$

$e = -1.16e^{-8}$

Aplicando os dados das Tabelas 02 e 03 na equação 5.1, obteve-se o gráfico abaixo:

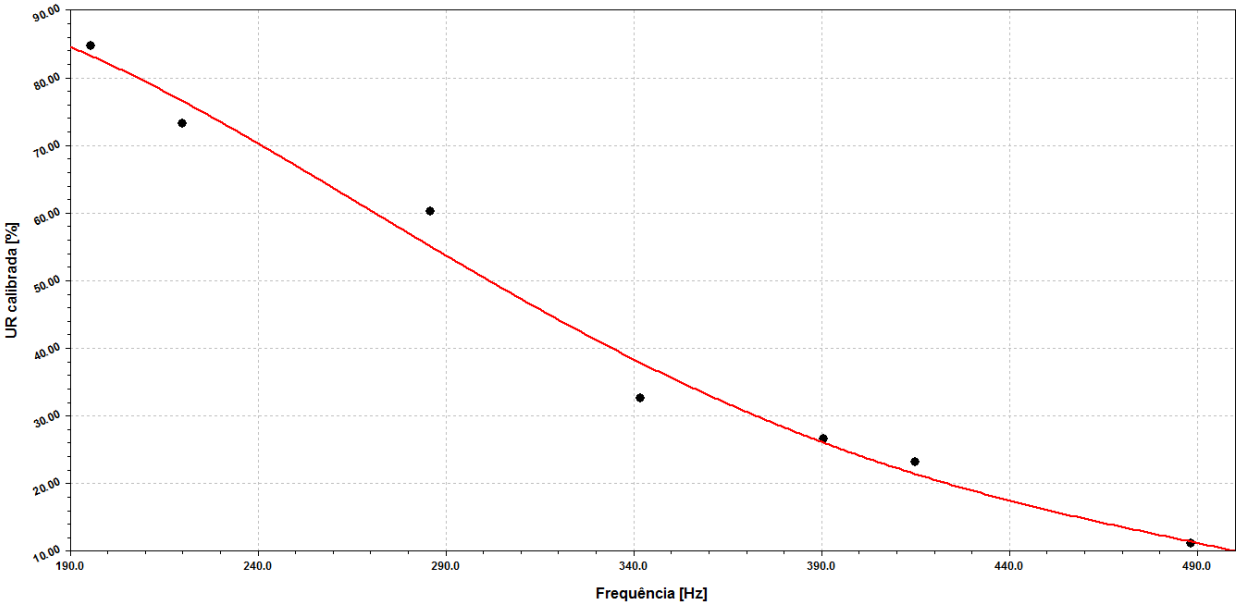

Figura 10: Gráfico de calibração UR x Frequência

5.2 TESTE DE VALIDAÇÃO

Para testar a calibração do instrumento, gerou-se frequências em arranjos aleatórios de variação de temperatura e conteúdo de umidade. Os mesmos são gravados e executou-se o mesmo procedimento para obtenção da frequência (f_{lida}). Utiliza-se a Equação 5.1 para encontrar a umidade relativa (UR), como mostra a tabela a seguir:

Tabela 04: Comportamento da umidade relativa calculada para amostras aleatórias de conteúdo de umidade e temperatura

CASO	$T[°C]$	$f_{lida}[Hz]$	$UR_{ref}[\%]$	$UR[\%]$	ERRO (%)
1	23.3	293	59.5	*52.5*	11.76%
2	40.8	390.6	23.7	*26.1*	9.13%
3	55.7	450	11.6	*13.3*	12.78%
4	57	477	11.2	*12.5*	10.4%
5	41.8	366.2	28.5	*31.44*	9.4%
6	24.7	195.3	76	*83.4*	8.8%

A grande variação encontrada nas medições aleatórias, quando comparadas às calibradas, já era esperada. A membrana apresenta uma constante variação da tensão em virtude do meio que ela está exposta. Os arranjos aleatórios foram colhidos dias depois dos arranjos utilizados para a calibração. Neste intervalo de tempo, a pele de couro já havia sofrido com a mudança climática e não possuia mais a mesma condição de tensão do dia da calibração do instrumento. Porém, os resultados apresentam coerência, quando comparados aos dados calibrados. É possível verificar um erro sistemático que varia entre 8.8 e 12.78%. Por este fator, fica evidente que a pele perdeu tensão no intervalo de tempo entre os experimentos de calibração e testes de validação.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho é construído um medidor de umidade relativa do ar, que varia de 10 a 90 %, através da frequência emitida por uma membrana em couro, quando excitada. Observou-se que a frequência emitida pela membrana varia inversamente proporcional com a quantidade de conteúdo de umidade absorvida, e proporcional ao aumento da temperatura, de acordo com o esperado.

Entretanto, os resultados medidos de frequência nem sempre foram precisos. Em dias diferentes de testes, para a mesma umidade relativa informada pelo equipamento calibrado (Vaisala), o valor da frequência apresentou variações devido à variação no estiramento da membrana. Apesar de apresentar esta defasagem no resultado, a membrana apresenta um comportamento similar e um mesmo traçado de gráfico, porém defasado para cima ou para baixo do calibrado.

Como sugestão para a continuação desta pesquisa, algumas modificações poderiam ser feitas para a melhoria da medição, como:

- Isolamento do ambiente de testes para evitar a captação de ruídos indesejados;
- Climatização da sala, mantendo sempre a mesma temperatura quando deseja-se uma menor incerteza;

- Estudar o comportamento da membrana em couro, quando exposta à temperaturas abaixo de 23°C;
- Elaborar algum mecanísmo capaz de detectar a tensão da pele, afim de obter uma relação mais precisa da variação da tensão, frente aos dados variados neste experimento.

Os resultados obtidos pelo dispositivo desenvolvido correspondeu à teoria apresentada, porém, o estudo mostra que a metodologia aplicada não foi eficaz para tornar este dispositivo aplicável à medição de umidade relativa do ar.

REFERÊNCIAS

Baron Rayleigh, **"John Strutt, 3rd Baron Rayleigh"**, http://en.wikipedia.org/wiki/Lord_Rayleigh, Acessado em 23/03/2013.

BELL, Stephanie, **"A Guide to the Measurement of Humidity"**, Institute of Measurement and Control, ISBN 0-904457-24-9, 1996

Buddies, S. **"Hairy Science: Measuring Humidity with a Hair Hygrometer"**, Scientific American, Abril 2012.

C. Calendo, E. Verona, A. D'Amico, A.Furlani, G. Lucci and M.V. Russo, **"Surface acoustic wave humidity sensor"**. *Sensors and Actuators B*, 15-16 (1993) 288-292

CORTÊS, Emanuel Felipe da Silva, **"Cifração de arquivos Wave"**, Dezembro 2006

COOLEY, J. W., TURKEY, J.W. **"An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series"**, Mathematic Computation, 19:297:301, 1965

DIAS, João Batista, **"Construção e Validação de uma Bancada para Calibração de Sensores para Determinação de Umidade Relativa do Ar"**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001

FRITCHEN, Leo, GAY, Lloyd W., **"Environmental Instrumentation"**, Springer-Verlag, New York, 1979

KESTER, Walt, **"Fast Fourier Transforms"**, Section 5.

KINSLER, Lawrence; FREY, Austin **"Fundamentals of Acoustics"**, John Wiley & Sons, Inc. New York – London, 1962.

MARIN, Fábio Ricardo; ANGELOCCI Luiz Roberto; COELHO FILHO, Maurício Antônio; VILLA NOVA, Nilson Augusto. **"Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar"**. In: Scientia Agricola, v.58, n.4, p.839-844, out./dez. 2001

Q. Lin, Y. Li and M.Yang, **“Highly sensitive and ultrafast response surface acoustic wave humidity sensor based on electrospun polyaniline/poly(vinyl butyral) nanofibers”**, *Analytica Chimica Acta,* 748 (2012) 73-80.

Rayleigh wave, **“Rayleigh waves”**, http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_waves, Acessado em 23/03/2013.

ANEXO(S) ou APÊNDICE(S)

APÊNDICE A

Para a construção do medidor de umidade relativa, foram utilizados os seguintes materiais:

- Uma gaixeta com pele de couro GOPE;
- 1 baqueta de madeira;
- Um corpo de aspirador pó de plástico duro;
- 2 taboas plásticas;
- Fitas dupla-face;
- 2 luvas de PVC de diâmetro 75 mm;
- Microfone Advent – Modelo ADE 300N;
- Computador com placa de som;
- Software para aquisição e tratamento dos dados: insTuner, Audacity e Matlab;

A bancada de testes na qual será utilizada para calibrar o medidor experimental é composta pelos ítens abaixo:

- 1 ventilador;
- 1 aquecedor;
- 1 umidificador;
- 1 anemômetro ICEL Gubintec - Modelo AN-10;
- 3 termopares;
- Tubulação em PVC de diâmentro 100 mm;
- 1 multimetro multicanais VAISALA – Modelo PTU303;
- 1 Data Acquisition HP – Modelo 34970A;

Um esquema de montagem da bancada de testes é mostrado na Figura abaixo:

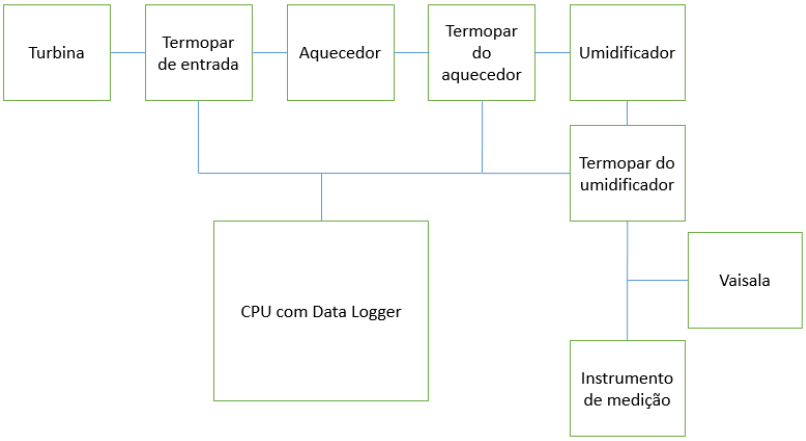

Figura 01-A: Esquema de montagem da bancada experimental

APÊNDICE B

Este apêndice apresenta o programa utilizado para realizar a FFT dos pulsos analógicos, através do método do Periodograma:

```
%% programa PERIODOGRAMA DA FREQUENCIA EMITIDA
clear all; close all; clc;


%% CONFIGURA O TAMANHO DA JANELA DE LEITURA
N=32768;
M=5;

n=1:N; %DEFINE A ESCALA NO EIXO "TEMPO"
k=0:N-1; %DEFINE A ESCALA NO EIXO "FREQUÊNCIA"

x=zeros(M,N);
%% CAPTURA O SINAL ANALÓGICO E TRANSFORMA PARA O DIGITAL
[aux,fs]=wavread('pulso1_caso1.wav');
    x(1,:)=aux(1:32768);
[aux,fs]=wavread('pulso2_caso1.wav');
    x(2,:)=aux(1:32768);
[aux,fs]=wavread('pulso3_caso1.wav');
    x(3,:)=aux(1:32768);
[aux,fs]=wavread('pulso4_caso1.wav');
    x(4,:)=aux(1:32768);
[aux,fs]=wavread('pulso5_caso1.wav');
    x(5,:)=aux(1:32768);

%% ACERTO DAS ESCALAS
ts= 1/fs; %delta t
deltaf=fs/N;
t=ts*n; %DEFINE ESCALA DE TEMPO EM SEGUNDOS
f=deltaf*k; %DEFINE ESCALA DE FREQUÊNCIA EM HERTZ
```

```
%% PLOTA O SINAL DIGITAL: AMPLITUDE X TEMPO

subplot(5,1,1);plot(t,x(1,:));title('Sinal Digital no Tempo');
subplot(5,1,2);plot(t,x(2,:));
subplot(5,1,3);plot(t,x(3,:));
subplot(5,1,4);plot(t,x(4,:));
subplot(5,1,5);plot(t,x(5,:));xlabel('t[s]');

%% LIMPA A VARIÁVEL AUX
clear aux;

%% REALIZA A MATRIZ DE DADOS FFT E SALVA OS ESPECTROS ABSOLUTOS
y=zeros(M,N);


for i=1:M
    aux=fft(x(i,:));
    y(i,:)=abs(aux);
end

%% PLOTA O ESPECTRO DA FREQUÊNCIA DO SINAL DIGITAL
subplot(5,1,1);plot(t,y(1,:));title('Espectro do Sinal Digital - FFT');
subplot(5,1,2);plot(t,y(2,:));
subplot(5,1,3);plot(t,y(3,:));
subplot(5,1,4);plot(t,y(4,:));
subplot(5,1,5);plot(t,y(5,:));xlabel('f[Hz]');

%% CALCULA A MÉDIA DOS ESPECTROS DOS 5 CASOS

espectro=mean(y);
%% PLOTA O RESULTADO DA MÉDIA DOS ESPECTROS

plot(f(1:N/64),espectro(1:N/64));

%% SE NECESSÁRIO, UTILIZAR PARA SUAVIZAR O GRÁFICO CONFORME FATOR "a"
[b,a]=butter(2,0.3);

espectro1=filtfilt(b,a,espectro);
figure;
plot(f(1:N/64),espectro1(1:N/64));
```