

**ESTUDO DE UM SENSOR INDUTIVO PARA MEDIÇÃO DE ADULTERAÇÃO DE
ÁLCOOL COMBUSTÍVEL**

Thales Almeida de Oliveira Silva

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

Prof. José Luiz da Silva Neto, Ph.D.
(Orientador)

Prof. Rubens de Andrade Júnior, D.Sc.

Eng. Cesar Cosenza de Carvalho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MARÇO DE 2010

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família pelo incentivo, pela dedicação, pelo apoio incondicional e principalmente pela paciência que tiveram comigo durante esses anos de graduação. Agradeço a minha mãe, por abrir mão de sua carreira para nos criar e educar. Ao meu pai, que sempre fez o que pôde para oferecer sempre o melhor a nós. Sei o quanto foi investido em mim para que eu chegasse até aqui e sou grato por tudo que fizeram por mim.

À minha noiva Angélica, pelo amor, carinho, companheirismo e cumplicidade. Muito obrigado por todo o apoio nos incontáveis finais de semana de estudo, em todas as provas e trabalhos realizados. A graduação e muitas outras conquistas em minha vida teriam sido impossíveis sem ela.

Ao professor José Luiz da Silva Neto, pelas oportunidades que me ofereceu ao longo desses anos, pela confiança depositada em mim, pela paciência, pela amizade e por sempre mostrar a “luz no fim no túnel” quando tudo parecia perdido.

Aos amigos do colégio e os de longa data, que sempre estiveram comigo e dispostos a me ajudar em qualquer coisa, mesmo quando não podiam me ajudar em nada. Por entenderem que uma prova na segunda-feira significa inexistência de final de semana.

Aos amigos de faculdade, que se tornaram fiéis companheiros durante esta nossa longa e cansativa jornada. Agradeço pelos grupos de estudo, pelas matérias xerocadas, pelas dicas, pelas palavras de incentivo e pelas confraternizações.

A todos os amigos em geral, por fazerem parte desta grande “família”, por estarem sempre dispostos a ajudar, mesmo não entendendo nada, por estarem sempre por perto, mesmo estando longe, pelos diversos momentos de descontração, mesmo nas horas de estudo, pelos diversos passeios e pela amizade.

RESUMO

Este trabalho se baseia em um projeto do INMETRO em parceria com a ANP e consiste no desenvolvimento, montagem e calibração de um sensor indutivo para medição de adulteração em álcool etílico hidratado combustível (AEHC) e sua possível aplicação em bombas de postos de abastecimento.

A ideia da construção deste sensor indutivo se deve ao aumento do consumo de álcool como combustível devido ao advento dos veículos modalidade *flex*, ao aumento do número de casos de adulterações em diversas regiões do país e aos prejuízos que são causados anualmente aos cofres públicos com a sonegação de impostos.

Após analisar diversos tipos de núcleos de indutor, foi escolhido o núcleo que apresentava o melhor Fator de Indutância e a menor perda por correntes de Foucault e histerese. A indutância foi estimada por meio de equações encontradas na literatura e posteriormente verificada com uma ponte RLC.

É possível estabelecer uma relação entre a tensão de saída do sensor indutivo e a condutividade elétrica do meio em que ele se encontra. O sensor não tem como função determinar a condutividade elétrica das amostras analisadas, mas sim estimar a quantidade de água presente nas amostras.

Foram analisadas seis amostras de AEHC, sendo que quatro delas tinham as quantidades de água previamente conhecidas e duas foram obtidas em postos de

abastecimento. Cada amostra foi analisada em uma faixa de frequência de 500Hz a 100kHz de modo a determinar o comportamento do sensor indutivo nessas frequências.

Com um diagrama da resposta do ganho em função da frequência, determinou-se a faixa de operação do sensor. E por meio de um gráfico do ganho em função da concentração de álcool em cada amostra foi possível realizar uma calibração do sensor. Os valores dos ganhos do sensor em cada amostra foram correspondentes às condutividades de cada uma delas.

ÍNDICE

PÁG.

1. Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Organização do Texto	3
2. Fundamentos Teóricos e Práticos	5
3. Materiais e métodos utilizados	10
4. Resultados Experimentais	16
4.1 AEHC 70,0° INPM	17
4.2 AEHC 92,6 ° INPM	19
4.3 AEHC 92,8 ° INPM	21
4.4 AEHC 99,7 ° INPM	23
4.5 Amostra 1	25
4.6 Amostra 2	27
4.7 Análise de resultados	29
5. Conclusões e Sugestões	34
6. Referências Bibliográficas	36
Anexo A – Folha de ensaios da Thornton.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

PÁG.

Figura 2.1 – Indutor com núcleo de ar com um fluxo magnético associado a corrente i [4].....	6
Figura 2.2 – Indutor de núcleo toroidal, com um fluxo magnético associado a corrente i [5].	7
Figura 2.3 – Esquema demonstrando como a corrente elétrica induzida circula no líquido.	7
Figura 2.4 – Dois indutores de núcleo toroidal [6]	8
Figura 3.1 – Dimensões, em mm, do núcleo toroidal de ferrite, modelo NT-27/16/12-6000-TH50 da Thornton.....	10
Figura 3.2 – Sensor indutivo fixado com fita adesiva.....	12
Figura 3.3 – Comparação de tamanho entre o sensor indutivo e uma moeda de 10 centavos.....	13
Figura 3.4 – Sensor indutivo em operação. A bobina sensor é identificada pela letra S.....	13
Figura 3.5 – Esquema de montagem para os ensaios realizados no laboratório.....	15
Figura 4.1 – Amostra de AEHC 70,0°. Frequências de 500Hz (a), 1kHz (b), 5kHz (c), 10kHz (d), 50kHz (e) e 100kHz (f).	17
Figura 4.2 – Resposta em Frequência para o AEHC 70,0.....	18
Figura 4.3 - Amostra de AEHC 92,6°. Frequências de 500Hz (a), 1kHz (b), 5kHz (c), 10kHz (d), 50kHz (e) e 100kHz (f).	19
Figura 4.4 - Resposta em Frequência para o AEHC 92,6.....	20
Figura 4.5 - Amostra de AEHC 92,8°. Frequências de 500Hz (a), 1kHz (b), 5kHz (c), 10kHz (d), 50kHz (e) e 100kHz (f).	21
Figura 4.6 - Resposta em Frequência para o AEHC 92,8.....	22
Figura 4.7 - Amostra de AEHC 99,7°. Frequências de 500Hz (a), 1kHz (b), 5kHz (c), 10kHz (d), 50kHz (e) e 100kHz (f).	23
Figura 4.8 - Resposta em Frequência para o AEHC 99,7.....	24
Figura 4.9 - Amostra 1 de AEHC. Frequências de 500Hz (a), 1kHz (b), 5kHz (c), 10kHz (d), 50kHz (e) e 100kHz (f).	25
Figura 4.10 - Resposta em Frequência para a Amostra 1.....	26
Figura 4.11 - Amostra 2 de AEHC. Frequências de 500Hz (a), 1kHz (b), 5kHz (c), 10kHz (d), 50kHz (e) e 100kHz (f).	27
Figura 4.12 - Resposta em Frequência para a Amostra 2.....	28

Figura 4.13 – Resposta em frequência das diversas amostras	29
Figura 4.14 – Zoom da resposta do ganho em função da frequência (10kHz ~ 100kHz).	30
Figura 4.15 – Ganho complexo do sensor à frequência de 50kHz.....	32
Figura 4.16 – Relação entre o ganho do sensor e a concentração de AEHC nas amostras analisadas...	33

SIGLAS E ABREVIATURAS

PIS Programa de Integração Social

COFINS Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social

ICMS Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços

AEAC Álcool Etílico Anidro Combustível

AEHC Álcool Etílico Hidratado Combustível

ANP Agência Nacional do Petróleo

INMETRO Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

°INPM Fração em massa

A_L Fator de Indutância

AWG *American Wire Gauge*

1. Introdução

1.1 Motivação

Com o início das vendas de veículos modalidade *flex* no Brasil em 2003 o consumo de álcool combustível voltou a crescer. Tal crescimento veio acompanhado, infelizmente, do aumento nos casos de adulterações de álcool. Estas adulterações estão relacionadas com a sonegação fiscal na venda álcool etílico hidratado combustível (AEHC), que representa perda de R\$ 1 bilhão por ano aos cofres públicos [1]. Do total sonegado, cerca de R\$ 400 mil são relacionados ao PIS/COFINS. Outros R\$ 600 mil são devidos ao ICMS. Isso envolve a sonegação de quase dois bilhões de litros de combustível de um total de dezoito bilhões de litros comercializados.

Além dos prejuízos com a sonegação, a utilização de combustível adulterado aumenta o consumo do veículo e, conseqüentemente, aumenta a emissão de gases de efeito estufa.

De um lado, pressões ambientais forçam uma redução cada vez maior das emissões veiculares. De outro lado, a escalada contínua dos preços do petróleo pressiona para a produção de carros com motores mais econômicos. Neste contexto a indústria automotiva, dentro das possibilidades ditadas pela segurança e custo acessível ao consumidor, desenvolve motores mais compactos, sistemas de injeção mais eficientes, aperfeiçoa a aerodinâmica dos veículos e reduz o peso através da substituição de materiais.

Quando se observa estas mudanças que são realizadas nos motores com o objetivo de reduzir consumo e emissões, a qualidade do combustível assume um papel de suma importância.

No Brasil, o álcool etílico combustível pode ser classificado como álcool etílico anidro combustível (AEAC), que pode ser misturado à gasolina em determinadas porcentagens, e como AEHC, que é utilizado puro como combustível nos motores de combustão a álcool cujo teor alcoólico deve estar entre uma faixa estabelecida pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) e que, atualmente, segue as determinações da ANP [2] que estabelece que o teor alcoólico do AEHC deva ser de 92,6 a 93,8° INPM.

O AEHC pode ser adulterado simplesmente acrescentando água de maneira a aumentar a massa específica da amostra. A massa específica é obtida por meio do uso de densímetro segundo a norma NBR 5992 [3] que correlaciona a massa específica obtida com o teor alcoólico do AEHC.

A adulteração do combustível gera uma série de problemas, como:

- Aumento significativo na emissão de poluentes devido à má queima do combustível;
- Aumento do consumo de combustível pelos automóveis;
- Danos ao motor, corrosão das válvulas e da câmara de combustão além de causar danos à bomba de combustível devido principalmente à presença de cloro e sais minerais na água utilizada na mistura.

O controle da qualidade dos combustíveis é um processo que deve acontecer desde a produção até a comercialização final. Mas, sem dúvida, o controle rígido no final da cadeia,

no posto de combustível, é o ponto mais importante. Enquanto a contaminação nas etapas de produção, armazenagem e transporte onera apenas as empresas envolvidas, as contaminações ou adulterações que permanecem ao longo da cadeia ou que se originam diretamente no ponto final de venda oneram o consumidor, pelo maior custo em consumo.

Baseado nesta realidade surgiu o projeto detalhado a seguir, visando dar maior garantia à qualidade do álcool combustível na ponta final da cadeia, através de um sistema de medição já utilizado em outras aplicações, como por exemplo os sensores toroidais para medição de condutividade fabricados e comercializados pela ABB.

1.2 Organização do Texto

O Capítulo II cita alguns tipos de núcleos disponíveis no mercado, suas vantagens e desvantagens. Cita também como funciona o sensor indutivo e quais são as respostas esperadas para a análise de cada tipo de amostra.

No Capítulo III, foram descritos os materiais e métodos utilizados para realizar os ensaios e as medições; o motivo por se ter usado um núcleo de ferrite; o motivo da escolha das dimensões dos núcleos; e o cálculo da indutância do sensor. Foram descritos ainda os tipos de amostras utilizadas nos ensaios e as frequências que foram utilizadas para caracterizar o comportamento do sensor.

O Capítulo IV trata das curvas obtidas durante os ensaios e o significado prático delas. Analisou-se a resposta em frequência do sensor indutivo e como esta estava de acordo com a quantidade de água presente em cada amostra.

O Capítulo V apresenta as conclusões dos experimentos realizados, e algumas sugestões para trabalhos futuros e aprimoramentos do sensor. Compararam-se ainda alguns resultados obtidos com os resultados obtidos por um sensor capacitivo.

2. Fundamentos Teóricos e Práticos

O indutor, ou reator, é um dispositivo elétrico passivo que armazena energia na forma de um campo magnético criado pela corrente que o percorre. Esta capacidade de armazenar energia é medida pela sua indutância, em unidades de Henries. A indutância, por sua vez, depende das dimensões do indutor, do número de espiras que ele possui e do tipo de núcleo do indutor. Os tipos de núcleos mais comuns são do tipo ar, ferromagnético, aço laminado e ferrite mole.

O núcleo de ar define um indutor que não usa um núcleo magnético para obter uma determinada indutância. São geralmente indutores com núcleo de plástico, cerâmica, ar propriamente dito, ou qualquer outro tipo de material não-magnético. Apesar desse tipo de núcleo oferecer uma baixa indutância em relação aos núcleos ferromagnéticos, são frequentemente usados em aplicações onde a frequência é superior a 1MHz, pois não possuem perda de energia no núcleo. Esta perda ocorre em núcleos ferromagnéticos e aumenta de acordo com a frequência de operação.

Os núcleos ferromagnéticos utilizam um núcleo magnético, como o Ferro por exemplo, para aumentar a indutância. Este tipo de núcleo pode aumentar a indutância de um indutor em alguns milhares de vezes, pois aumenta o campo magnético devido à sua alta permeabilidade magnética. No entanto, este núcleo apresenta perdas por histerese e correntes de Foucault, além de saturar facilmente.

Os núcleos de aço laminado de indutores são muito parecidos com os núcleos de transformadores. O núcleo é feito de finas camadas de aço empilhadas, recobertas individualmente com uma camada isolante. Este isolamento evita que as correntes de Foucault circulem entre as lâminas, se limitando apenas a seção transversal da camada de aço, reduzindo drasticamente as perdas de energia. As camadas são feitas de aço-silício de grão orientado, que também reduz as perdas por histerese.

Os núcleos de ferrite mole podem ser usados largamente em altas frequências, pois o ferrite é uma cerâmica ferromagnética não-condutora. Logo, quase não há presença de correntes de Foucault no núcleo. Além disto, o ferrite mole possui uma baixa coercividade, o que significa que a magnetização do material pode facilmente mudar de direção, reduzindo as perdas de energia por histerese.

Como esses núcleos (com exceção dos núcleos de ar) possuem alta permeabilidade magnética eles confinam as linhas de fluxo magnético no seu interior, em *loops* internos, como mostra a Figura 2.1:

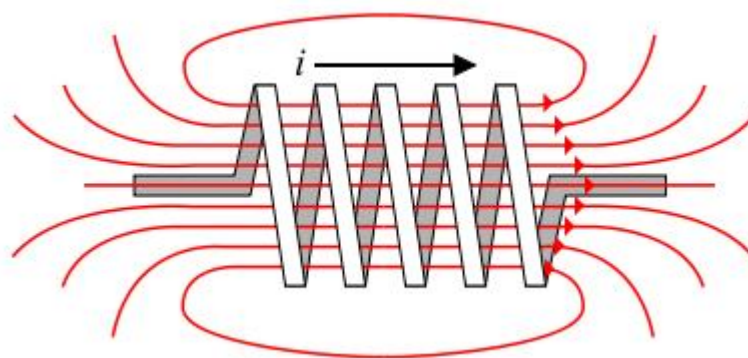


Figura 2.1 – Indutor com núcleo de ar com um fluxo magnético associado a corrente i [4].

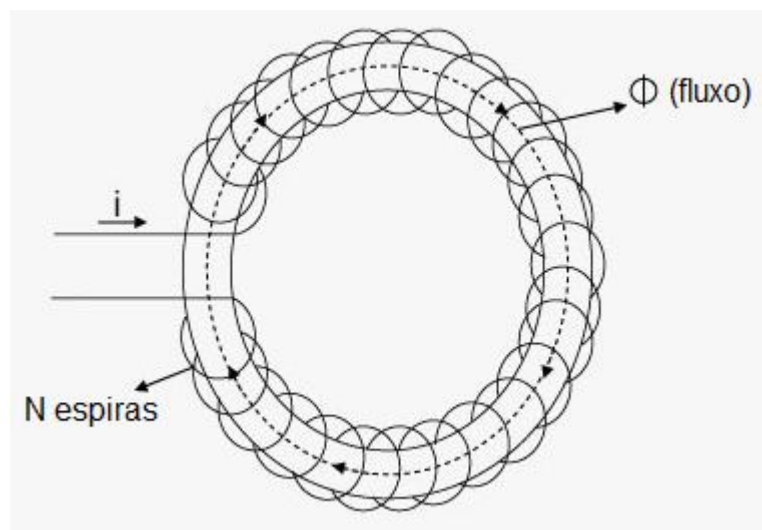


Figura 2.2 – Indutor de núcleo toroidal, com um fluxo magnético associado a corrente i [5].

Quando uma corrente percorre as espiras de um indutor de núcleo toroidal (Figura 2.2), a variação do fluxo magnético no núcleo produz um fluxo de corrente no líquido que preenche o centro da bobina (Figura 2.3). Se outro indutor estiver próximo o suficiente do primeiro, este fluxo de corrente causará uma variação de fluxo magnético no núcleo do segundo indutor, gerando assim uma tensão induzida nos terminais do segundo indutor.

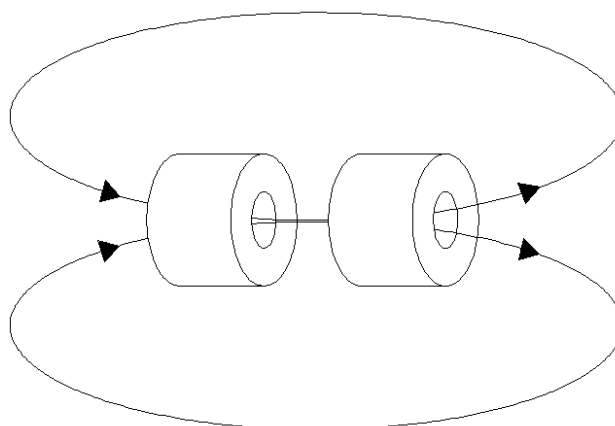


Figura 2.3 – Esquema demonstrando como a corrente elétrica induzida circula no líquido.

Se os dois indutores são dispostos de forma a alinhar o seu centro geométrico, a tensão induzida no segundo indutor é bem maior, pois o fluxo de corrente induzida no centro das duas bobinas será maior.



Figura 2.4 – Dois indutores de núcleo toroidal [6]

Desta maneira podemos obter uma relação entre a tensão medida no segundo indutor e a condutividade elétrica do meio no qual os indutores estão imersos.

A condutividade elétrica é uma propriedade específica de cada material, mas pode ser facilmente alterada se houver alguma mistura neste material ou presença de resíduos sólidos. No caso do AEHC, a condutividade elétrica máxima estabelecida pela NBR 10547 [7] é de $500\mu\text{S}/\text{m}$. Porém esta condutividade pode ultrapassar os valores estabelecidos caso o combustível seja adulterado.

A resolução No. 36 de 6 de dezembro de 2005 da ANP estabelece que o teor alcoólico do AEHC deve ser de $92,6$ a $93,8^\circ$ INPM. Isso significa que um álcool $92,6^\circ$ INPM possui

92,6% em massa de álcool e 7,4% em massa de água. Logo, uma quantidade superior a 7,4% em massa de água no combustível caracteriza adulteração.

A condutividade da água pode ser de 10 a 100 vezes maior que a condutividade do AEHC [8]. Logo, quanto mais água houver em uma determinada amostra de AEHC, maior será a sua condutividade. No caso de adulterações mais grosseiras, como a adição de água de torneira, a condutividade pode aumentar consideravelmente devido à alta concentração de minerais, resíduos sólidos e impurezas.

3. Materiais e métodos utilizados

Para a confecção do sensor indutivo foram utilizados dois núcleos toroidais de ferrite iguais e fabricados pela Thornton Eletrônica Ltda, modelo NT-27/16/12-6000-TH50. A folha de dados dos núcleos toroidais, bem como a folha de ensaios dos mesmos, encontra-se no Apêndice A. O núcleo de ferrite foi escolhido devido as suas características que reduzem a perda por histerese e por correntes de Foucault. As dimensões dos núcleos são mostradas na Figura 3.1.

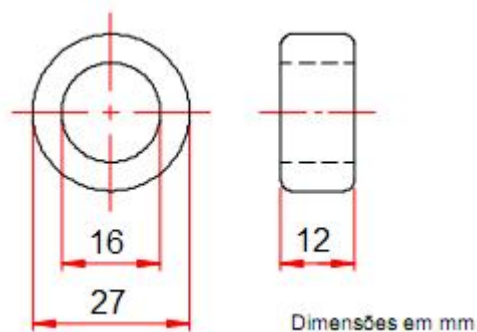


Figura 3.1 – Dimensões, em mm, do núcleo toroidal de ferrite, modelo NT-27/16/12-6000-TH50 da Thornton.

Este modelo foi escolhido por apresentar dimensões que permitiram uma fácil confecção manual do indutor e por apresentar alto A_L se comparado com núcleos de dimensões semelhantes, como os modelos NT-35/22/15-5000-TH50 (5000nH/espiras²) e NT-23/14/11-4400-TH50 (4400nH/espiras²).

O A_L está relacionado com a indutância da seguinte forma [9]:

$$A_L = \frac{L}{N^2} \quad (1.1)$$

Onde:

- L tem dimensão de Henries;
- A_L tem dimensão de H/espiras²;
- N número de espiras.

Como se pode perceber na equação (1.1), a indutância é diretamente proporcional ao quadrado da quantidade de espiras ao redor do núcleo. Baseado nisso, optou-se por utilizar o maior número possível de espiras e experimentalmente se observou que para um fio esmaltado de 25 AWG (0,16mm²) a quantidade máxima é de 100 espiras.

A folha de ensaios fornecida informa que o A_L para esses núcleos é de 6000nH/espira², com incerteza de $\pm 25\%$. Ou seja, o Fator de Indutância pode variar de 4500nH/espira² a 7500nH/espira². De posse dessa faixa de valores e da quantidade de espiras, pode-se estimar a faixa da indutância aplicando a equação (1.1):

$$(4500 \times 10^{-9}) \cdot (100)^2 = 45 \times 10^{-3} H$$

$$(7500 \times 10^{-9}) \cdot (100)^2 = 75 \times 10^{-3} H$$

Logo, a faixa de variação da indutância é de 45mH a 75mH. Todavia, como forma de verificar as estimativas baseadas na folha de ensaios e na equação (1.1) utilizou-se uma ponte RLC para fazer a medição exata da indutância de cada indutor. A medida retornou os seguintes resultados:

- Primeiro Indutor (*drive*): 57,5mH;
- Segundo Indutor (sensor): 61,0mH.

O que mostra que as medidas obtidas são compatíveis com os valores estimados.

Conforme já citado anteriormente no Capítulo I, ao alinhar o centro geométrico dos dois indutores o fluxo magnético se torna mais intenso, gerando um maior fluxo de corrente no AEHC e conseqüentemente elevando o nível de tensão observado no sensor propriamente dito (segundo indutor). Para garantir o alinhamento dessas bobinas elas foram presas com fita adesiva (Figura3.2), e a bobina sensor foi devidamente identificada pela letra S (Figura 3.4).



Figura 3.2 – Sensor indutivo fixado com fita adesiva.

A Figura 3.3 mostra uma moeda de 10 centavos usada como comparação para as dimensões do sensor indutor. A Figura 3.4 mostra o sensor em operação, imerso em AEHC e com a bobina sensor devidamente identificada.

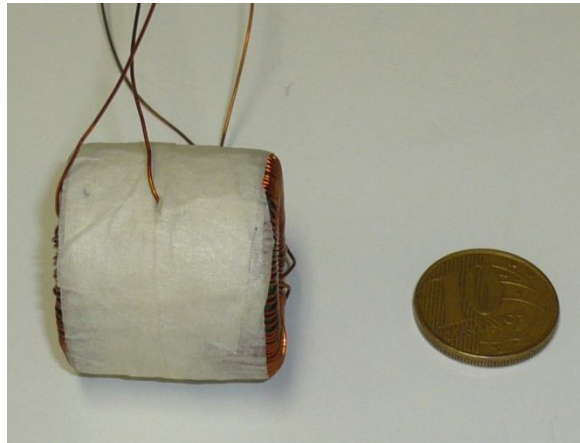


Figura 3.3 – Comparação de tamanho entre o sensor indutivo e uma moeda de 10 centavos.

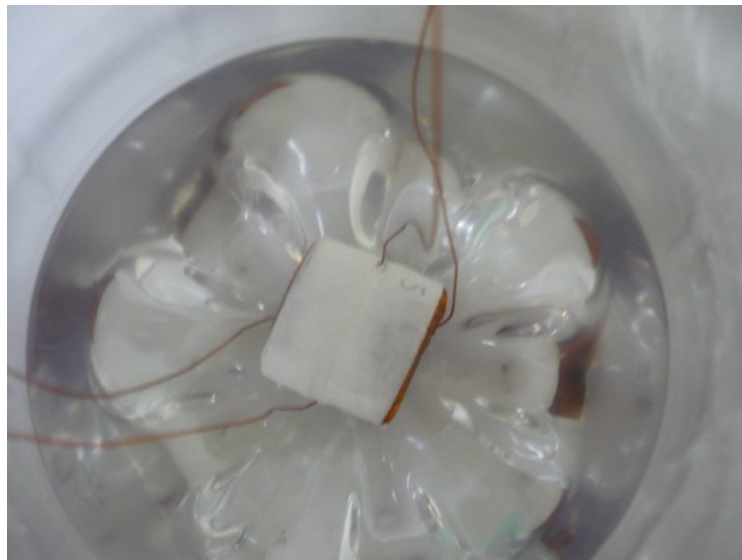


Figura 3.4 – Sensor indutivo em operação. A bobina sensor é identificada pela letra S.

Para se caracterizar o sensor indutivo foram utilizadas 4 amostras de AEHC em concentrações previamente conhecidas, sendo elas:

- 70,0° INPM;
- 92,6° INPM;
- 92,8 ° INPM;
- 99 ,7° INPM.

De forma a validar o sensor indutivo proposto foram testadas ainda duas amostras de AEHC obtidas em dois postos de combustíveis.

O sensor indutivo foi testado com todas as seis amostras nas seguintes frequências: 500Hz, 1kHz, 5kHz, 10kHz, 50kHz, e 100kHz, de modo a estabelecer qual a melhor frequência de operação do dispositivo.

Para evitar contaminação as amostras foram expostas ao meio externo o mínimo possível. A contaminação das amostras poderia ocorrer por mistura de partículas sólidas à solução ou ainda pela simples absorção da umidade do ar, já que o álcool é uma molécula hidrofílica [10].

O recipiente utilizado teve a sua parte superior selada por um filme PVC durante a realização de todos os experimentos. Após cada experimento, o AEHC utilizado era descartado e o recipiente era seco com folhas de papel-toalha, bem como o sensor indutivo.

O esquema de montagem para os ensaios realizados é mostrado na Figura 3.5. A bobina *drive* é excitada por um gerador de sinais e este sinal de tensão é adquirido pelo Canal 1 do osciloscópio, enquanto o Canal 2 do osciloscópio adquire o nível de tensão da bobina sensor.

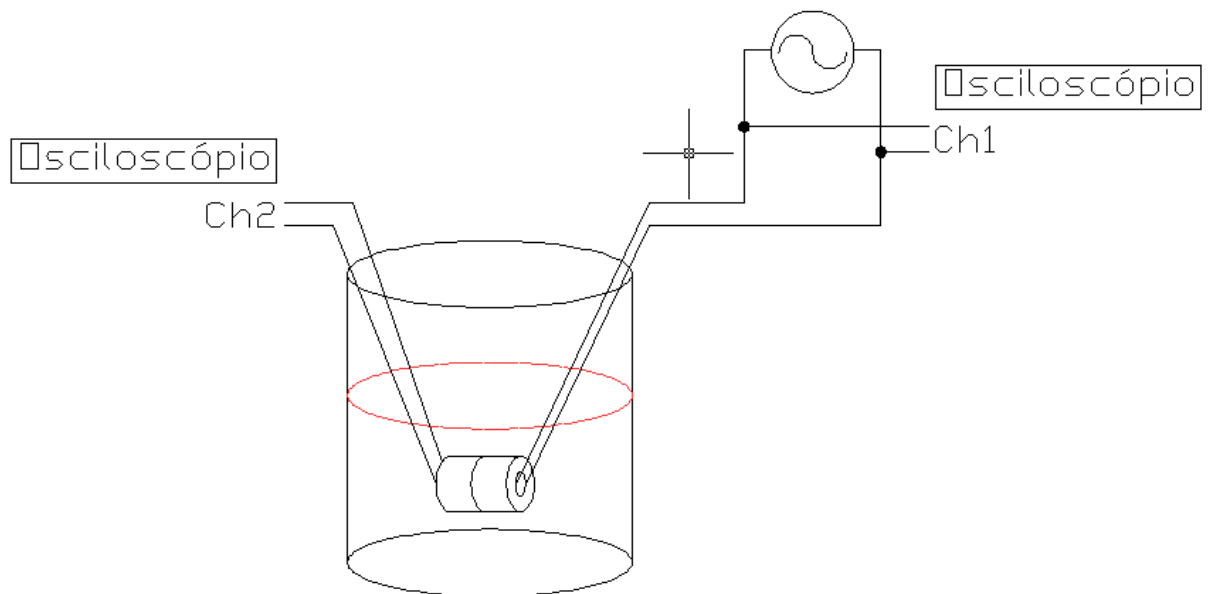


Figura 3.5 – Esquema de montagem para os ensaios realizados no laboratório.

4. Resultados Experimentais

Neste capítulo serão apresentadas as curvas obtidas nos diversos ensaios realizados. Por meio delas será feita uma análise do comportamento do sensor indutivo. Os ensaios foram separados de acordo com a amostra utilizada e em cada ensaio.

4.1 AEHC 70,0° INPM

Nesta seção estão presentes todas as curvas dos ensaios realizados com AEHC 70,0, bem como a resposta em frequência do sensor para a amostra.

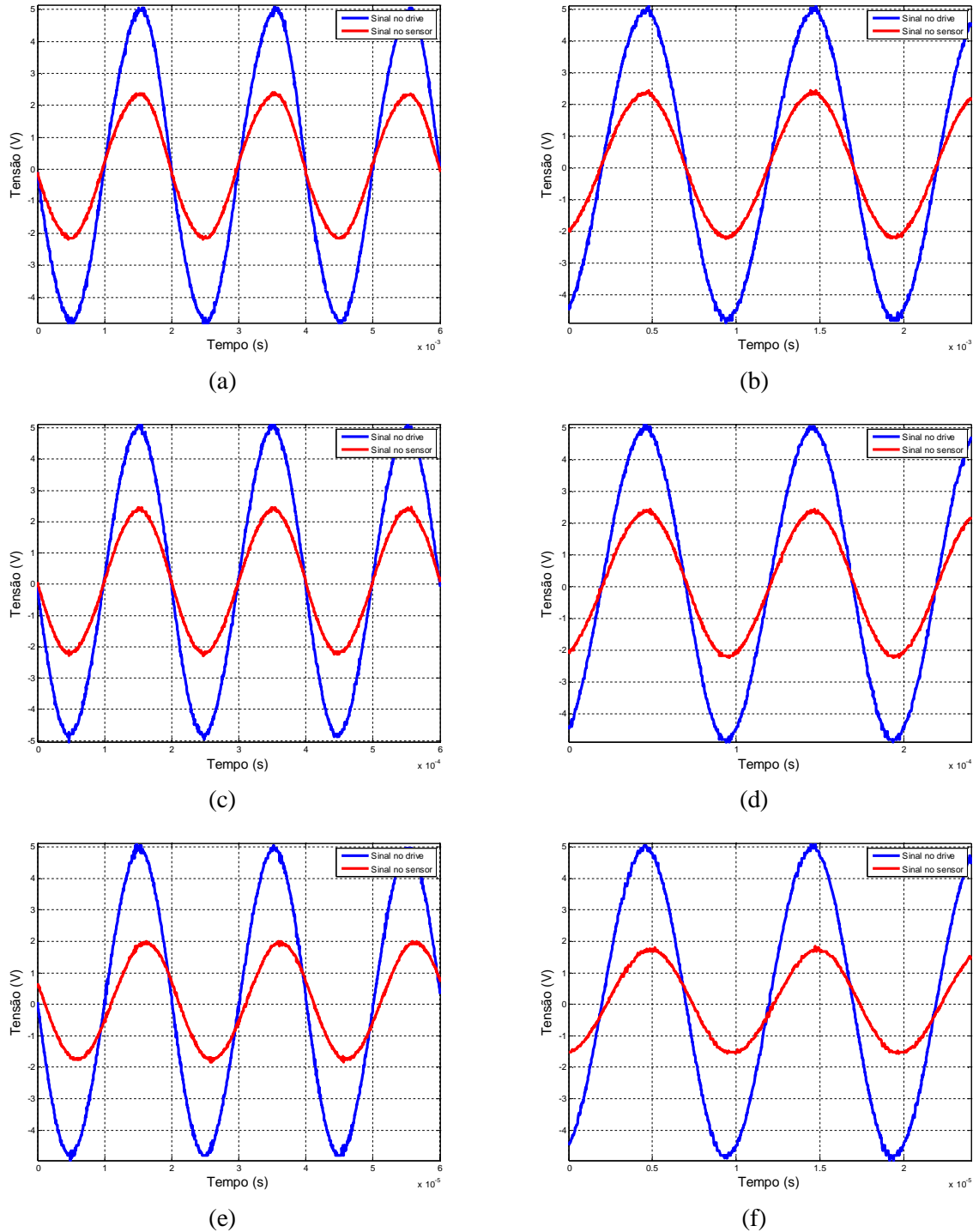


Figura 4.1 – Amostra de AEHC 70,0°. Frequências de 500Hz (a), 1kHz (b), 5kHz (c), 10kHz (d), 50kHz (e) e 100kHz (f).

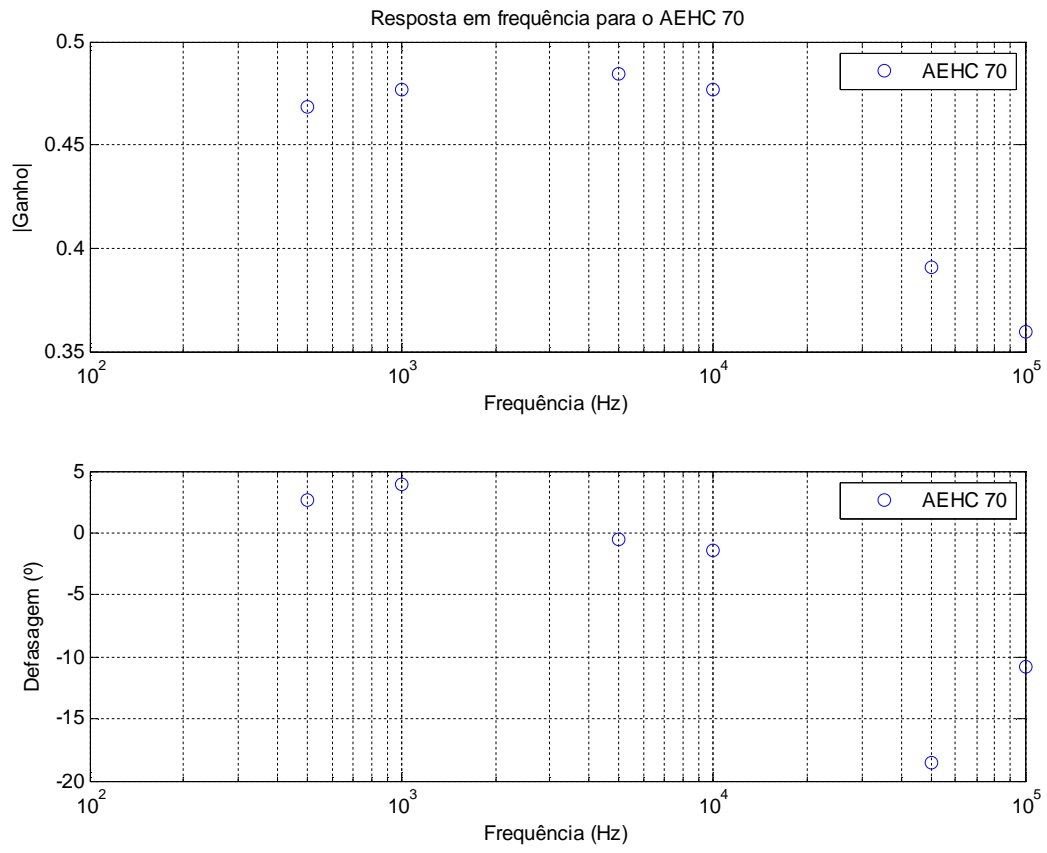
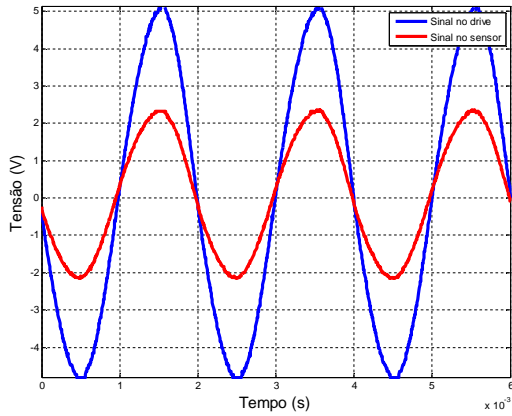


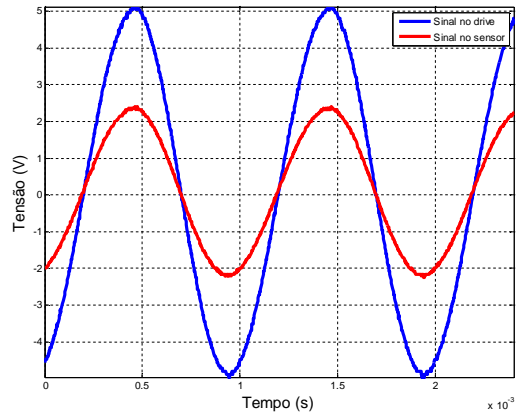
Figura 4.2 – Resposta em Frequência para o AEHC 70,0.

4.2 AEHC 92,6 ° INPM

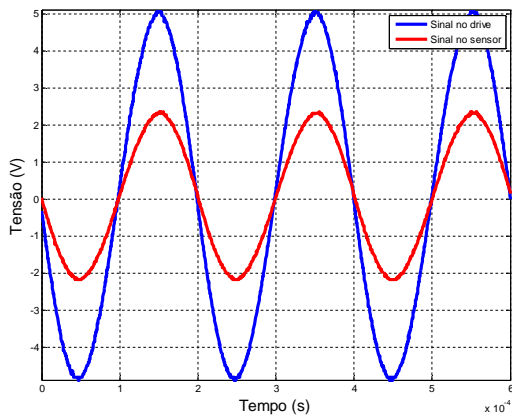
Nesta seção estão presentes todas as curvas dos ensaios realizados com AEHC 92,6, bem como a resposta em frequência do sensor para a amostra.



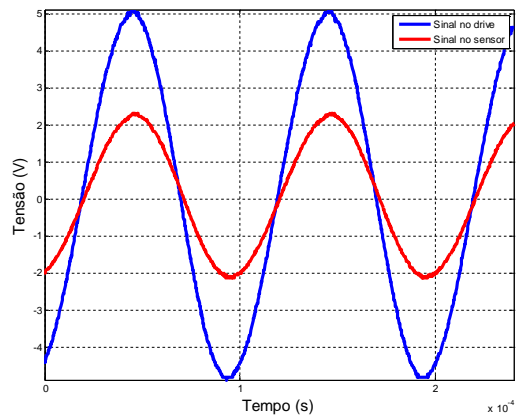
(a)



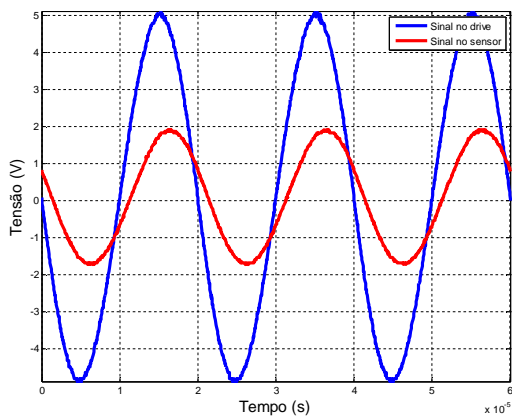
(b)



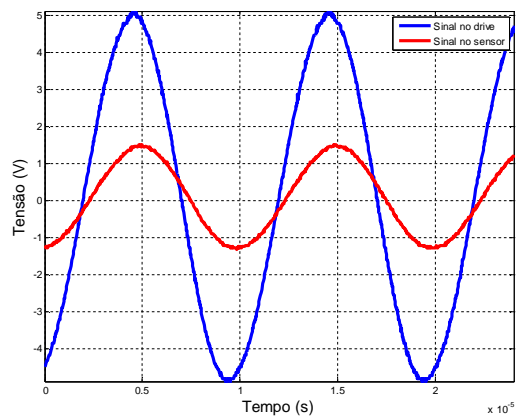
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.3 - Amostra de AEHC 92,6°. Frequências de 500Hz (a), 1kHz (b), 5kHz (c), 10kHz (d), 50kHz (e) e 100kHz (f).

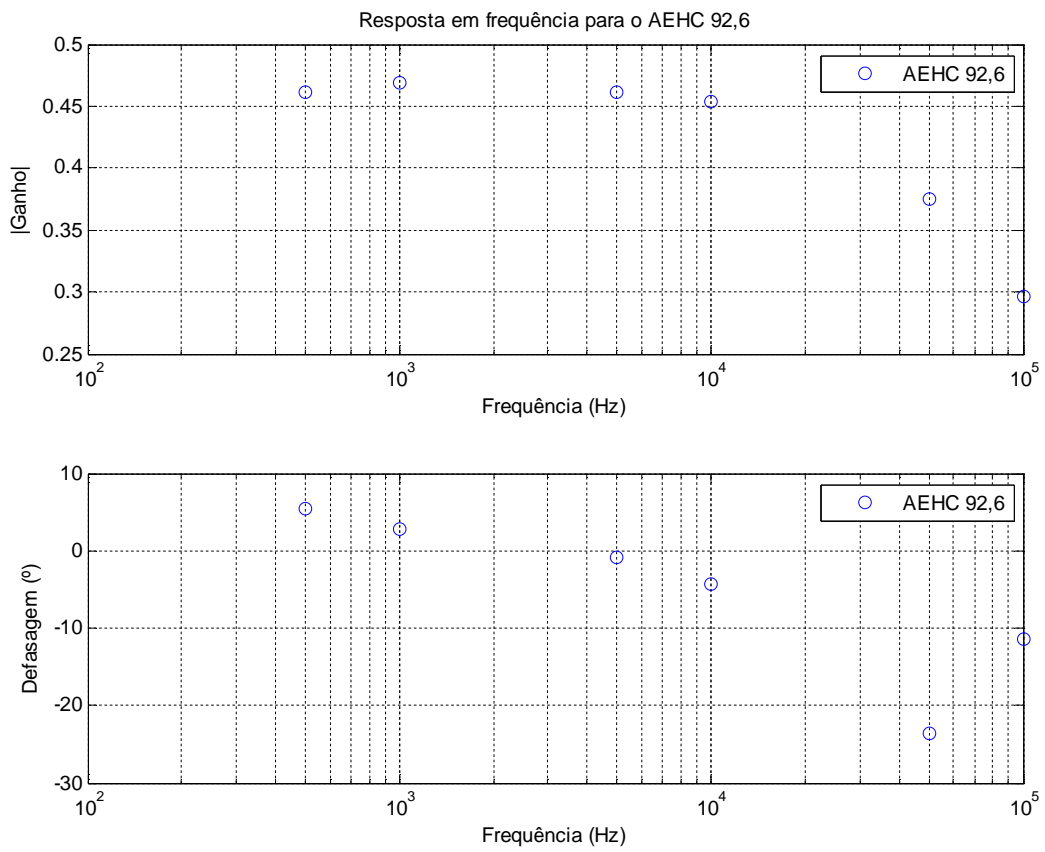


Figura 4.4 - Resposta em Frequência para o AEHC 92,6.

4.3 AEHC 92,8 ° INPM

Nesta seção estão presentes todas as curvas dos ensaios realizados com AEHC 70,0, bem como a resposta em frequência do sensor para a amostra.

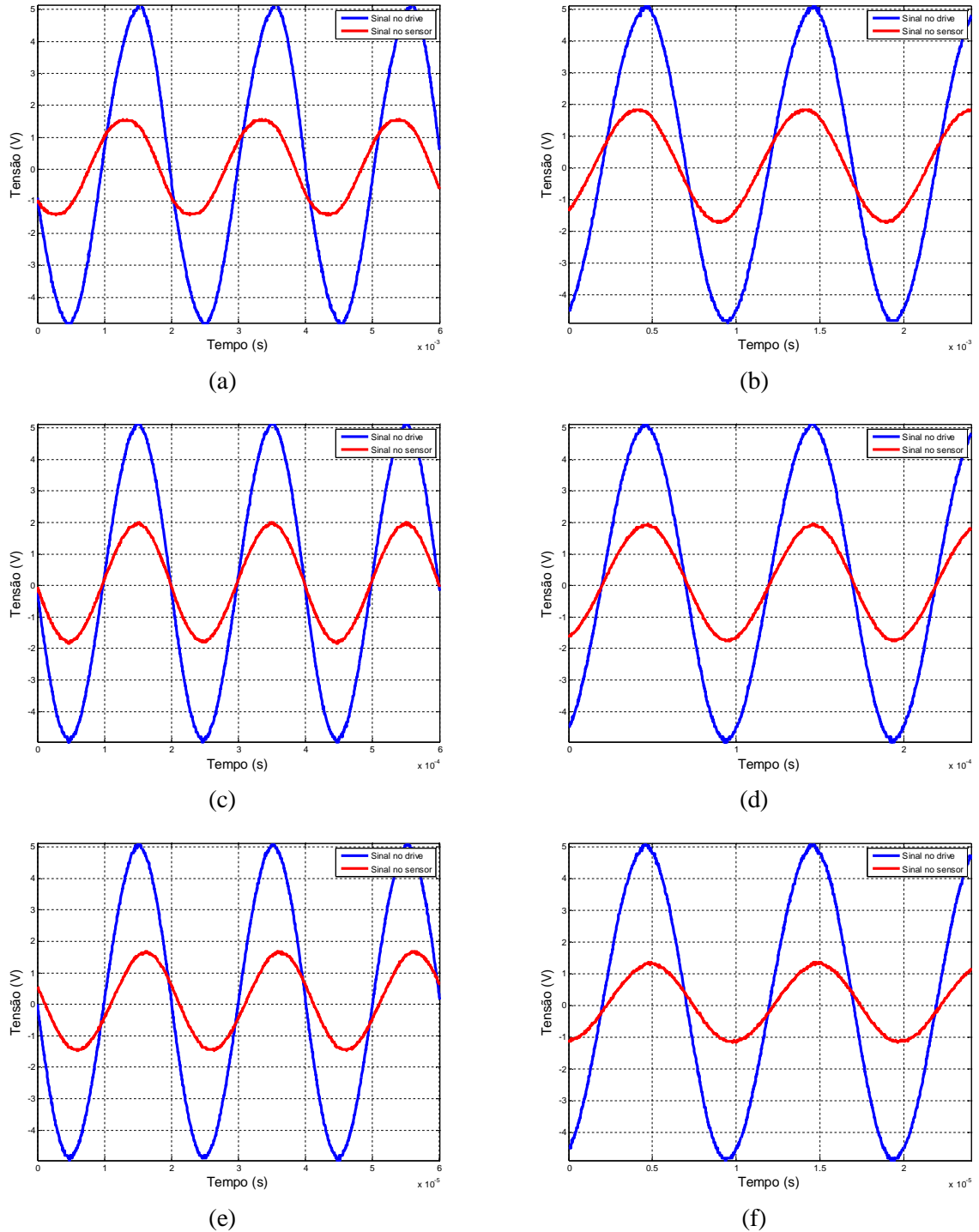


Figura 4.5 - Amostra de AEHC 92,8°. Frequências de 500Hz (a), 1kHz (b), 5kHz (c), 10kHz (d), 50kHz (e) e 100kHz (f).

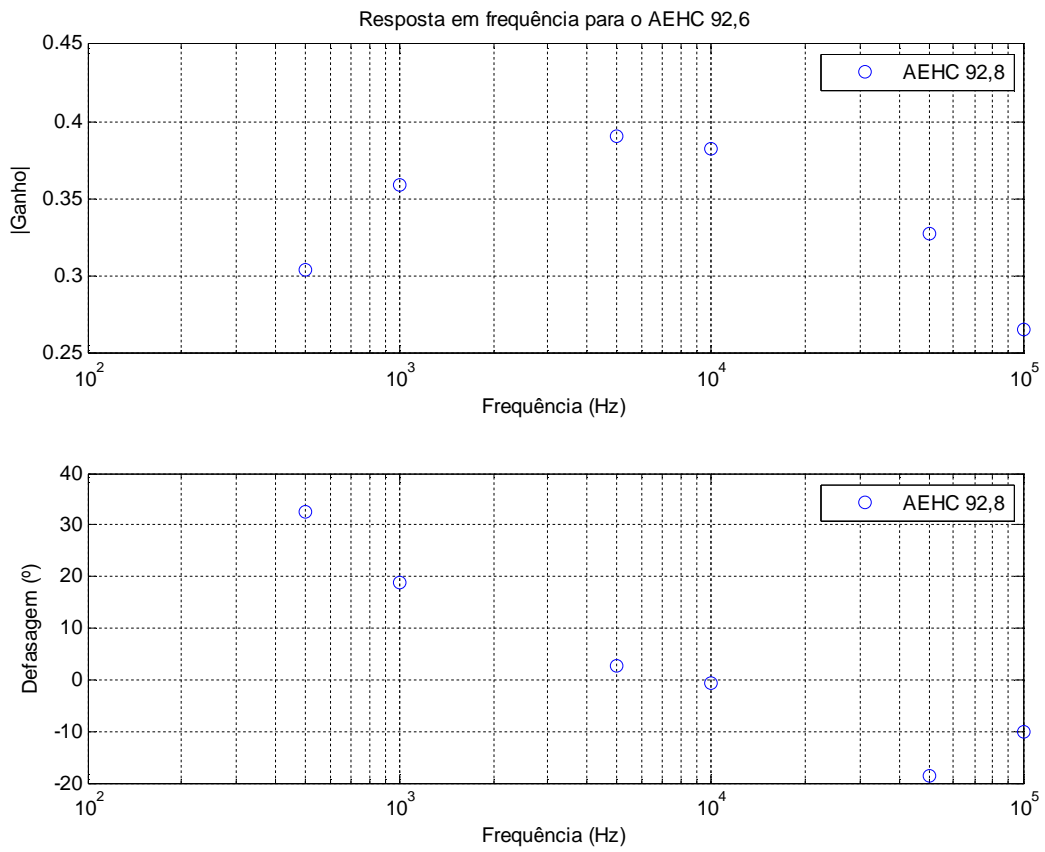


Figura 4.6 - Resposta em Frequência para o AEHC 92,8.

4.4 AEHC 99,7 ° INPM

Nesta seção estão presentes todas as curvas dos ensaios realizados com AEHC 97,7, bem como a resposta em frequência do sensor para a amostra.

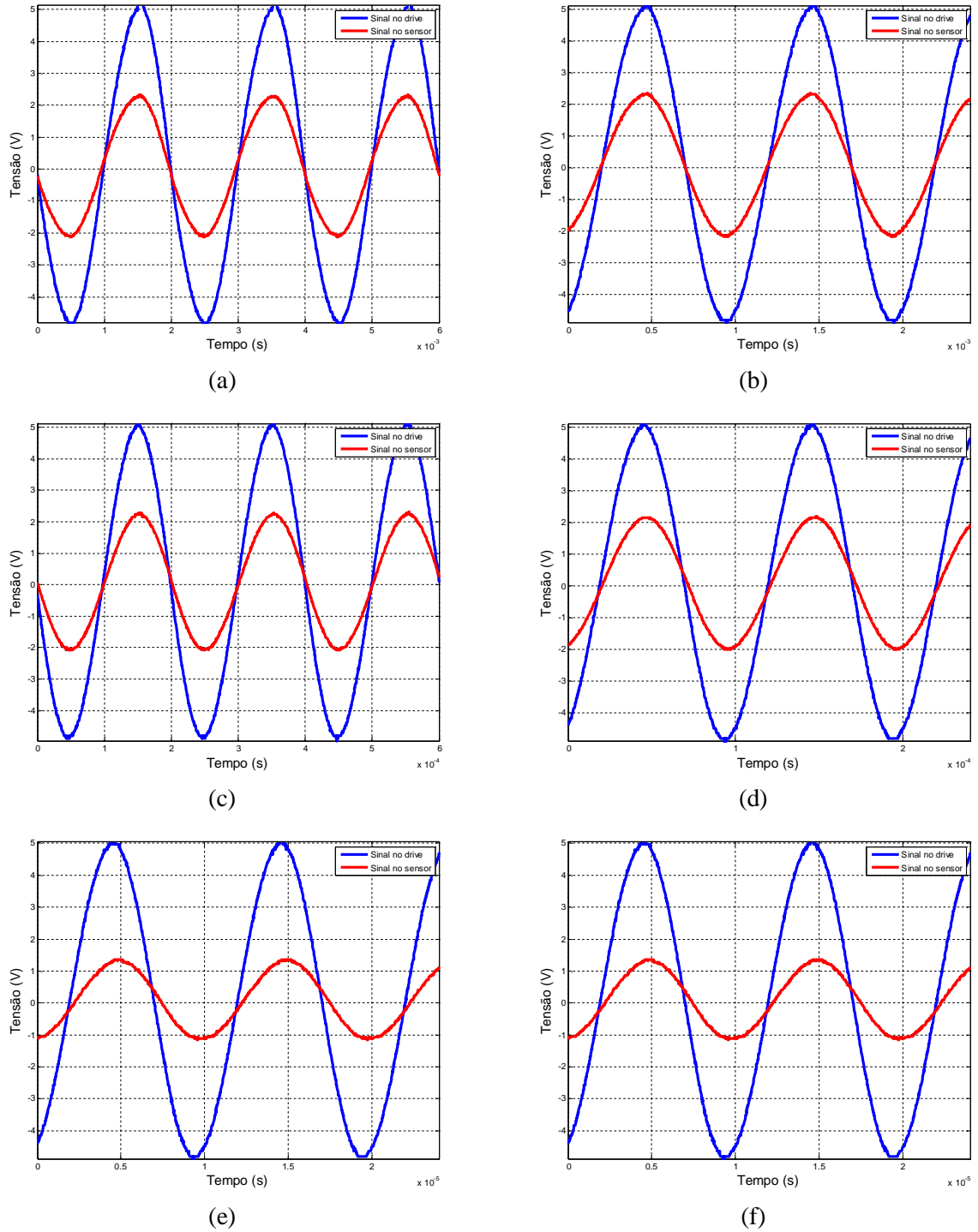


Figura 4.7 - Amostra de AEHC 99,7°. Frequências de 500Hz (a), 1kHz (b), 5kHz (c), 10kHz (d), 50kHz (e) e 100kHz (f).

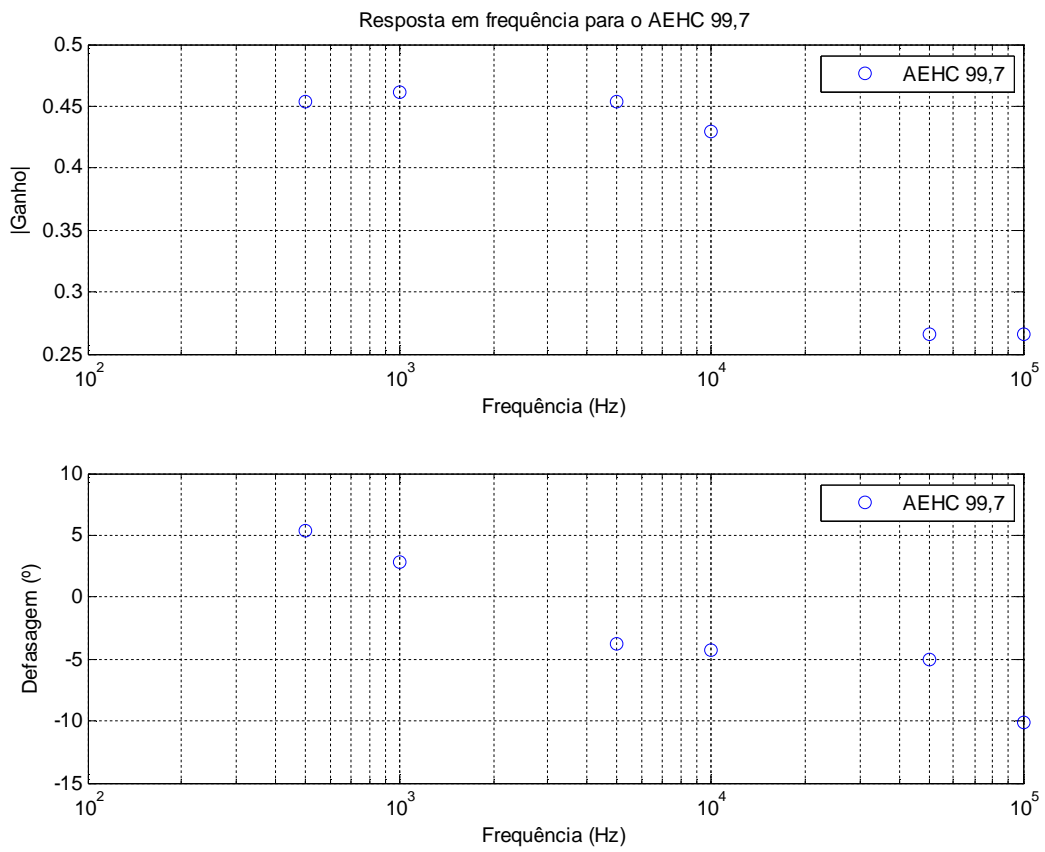


Figura 4.8 - Resposta em Frequência para o AEHC 99,7.

4.5 Amostra 1

Nesta seção estão presentes todas as curvas dos ensaios realizados com a Amostra 1, bem como a resposta em frequência do sensor para esta amostra.

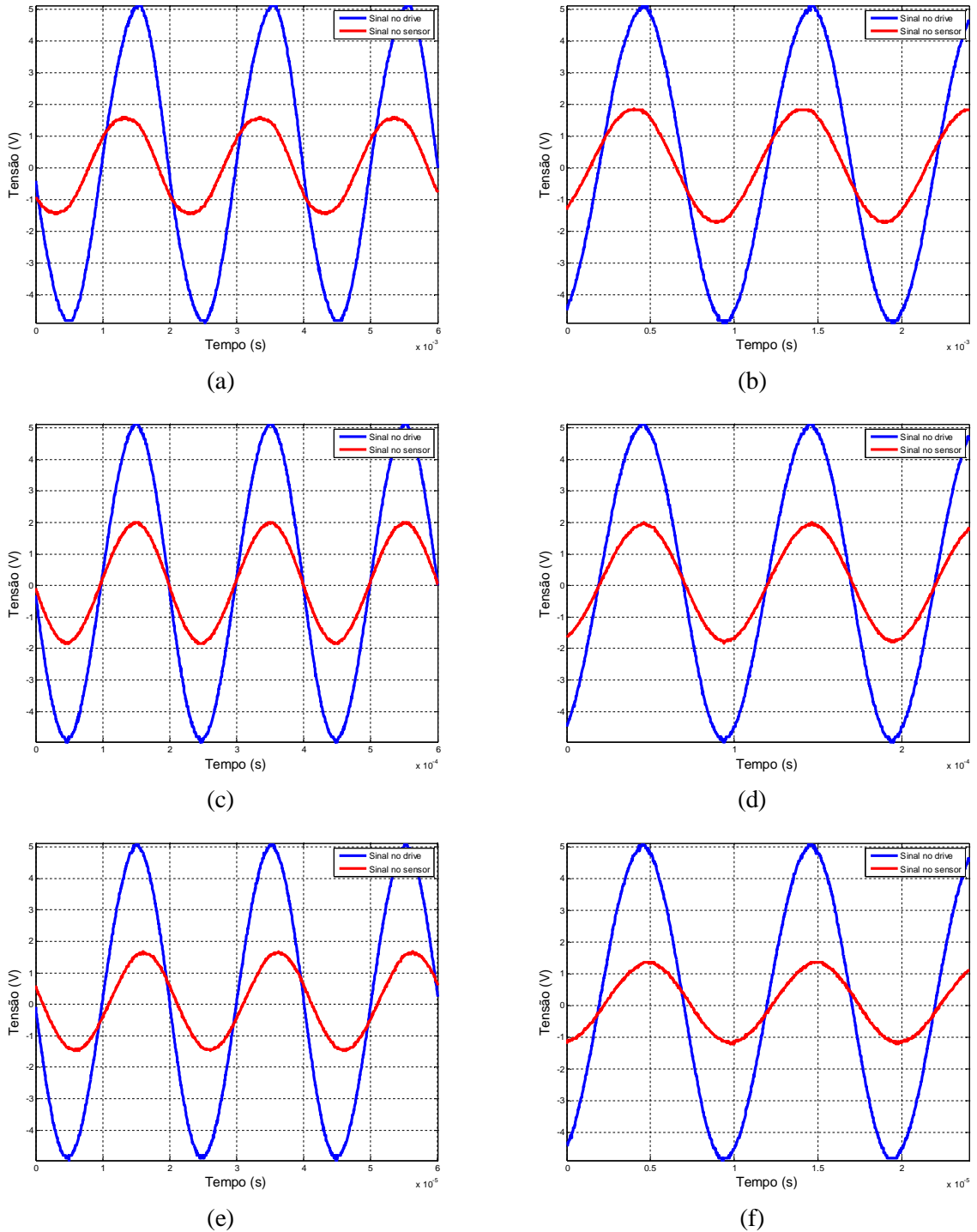


Figura 4.9 - Amostra 1 de AEHC. Frequências de 500Hz (a), 1kHz (b), 5kHz (c), 10kHz (d), 50kHz (e) e 100kHz (f).

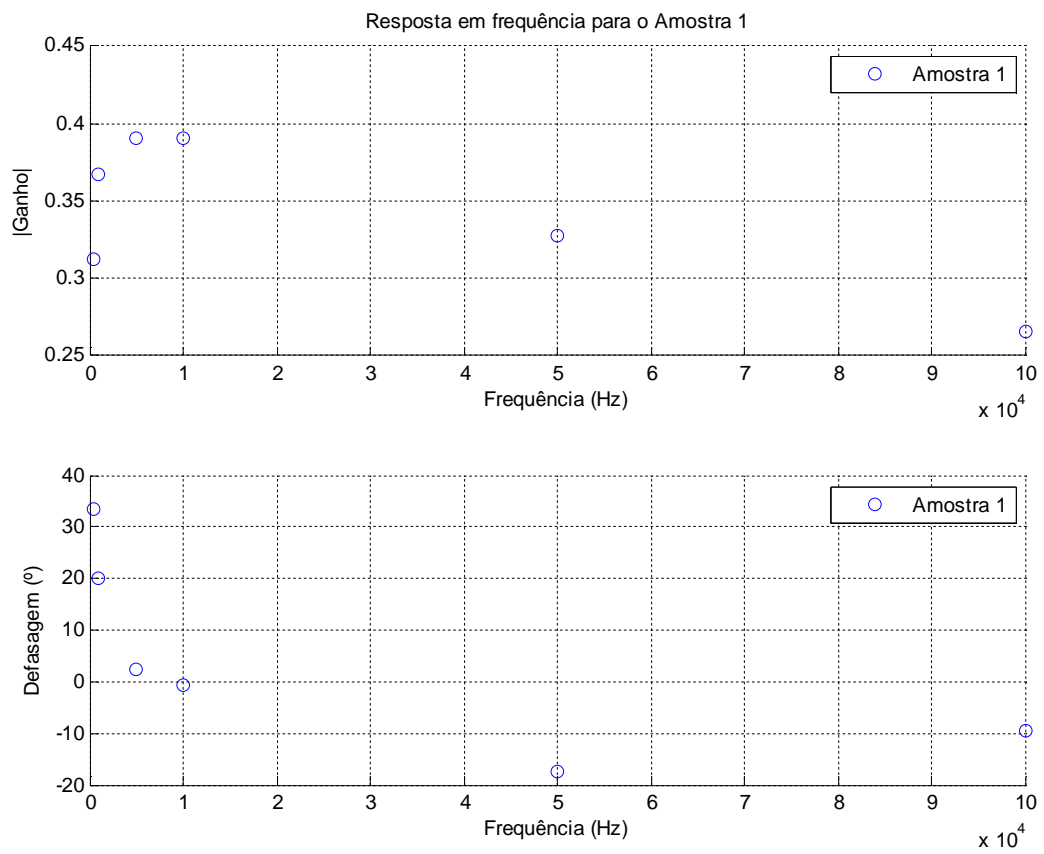


Figura 4.10 - Resposta em Frequência para a Amostra 1.

4.6 Amostra 2

Nesta seção estão presentes todas as curvas dos ensaios realizados com a Amostra 2, bem como a resposta em frequência do sensor para esta amostra.

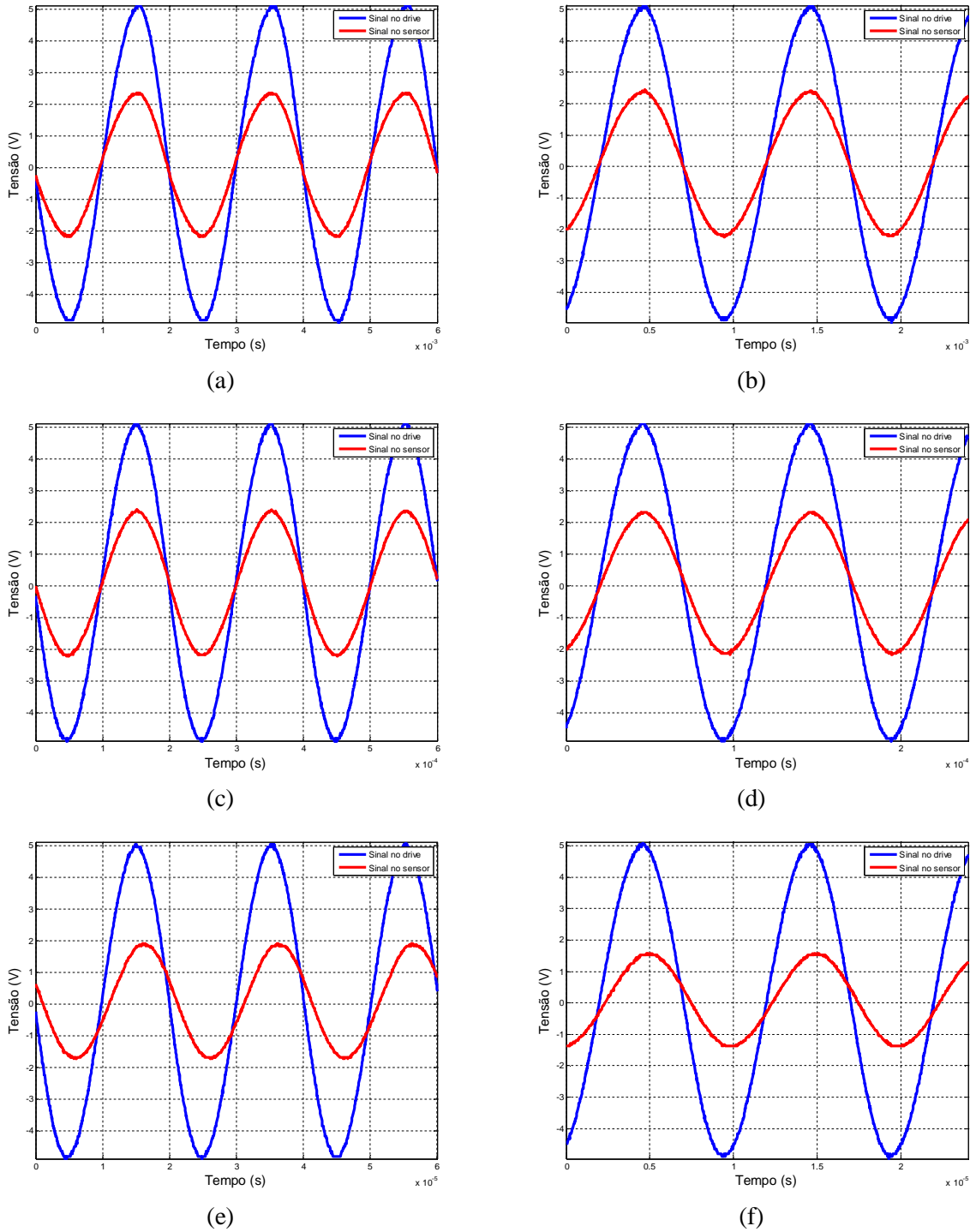


Figura 4.11 - Amostra 2 de AEHC. Frequências de 500Hz (a), 1kHz (b), 5kHz (c), 10kHz (d), 50kHz (e) e 100kHz (f).

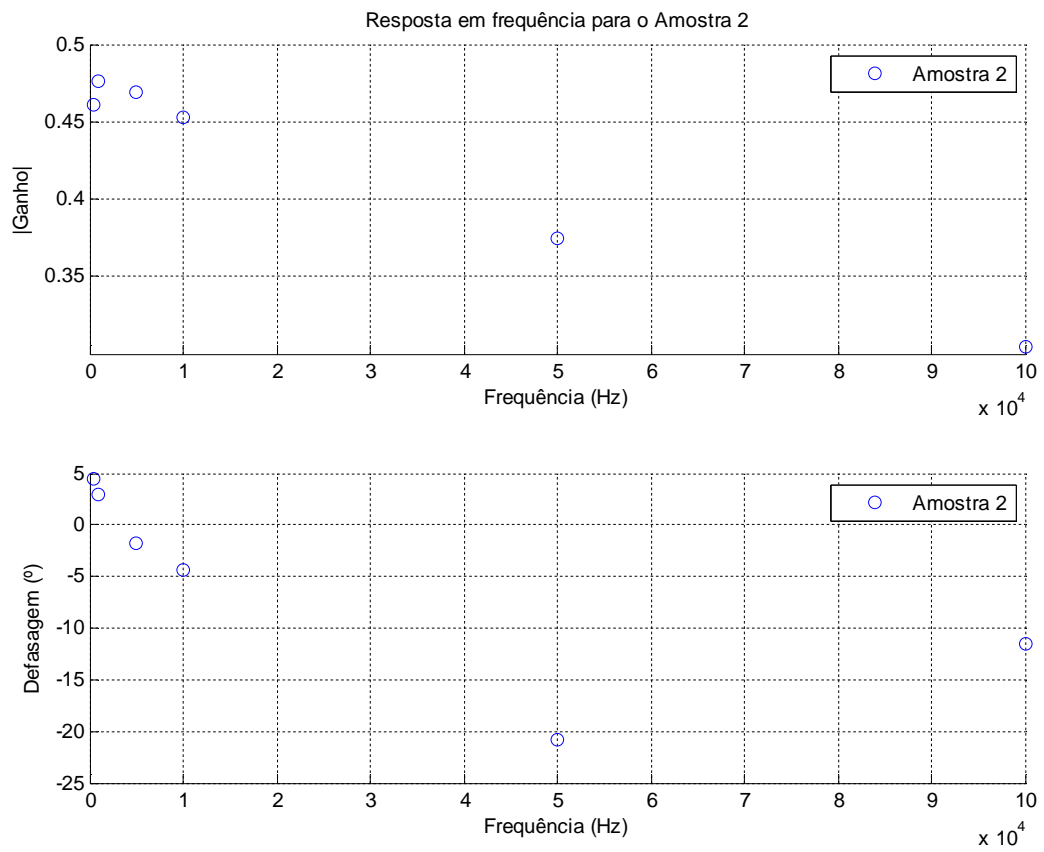


Figura 4.12 - Resposta em Frequência para a Amostra 2.

4.7 Análise de resultados

A análise do comportamento do sensor foi feita por meio das curvas obtidas e pela resposta em frequência para cada amostra. O resultado é exposto na Figura 4.13.

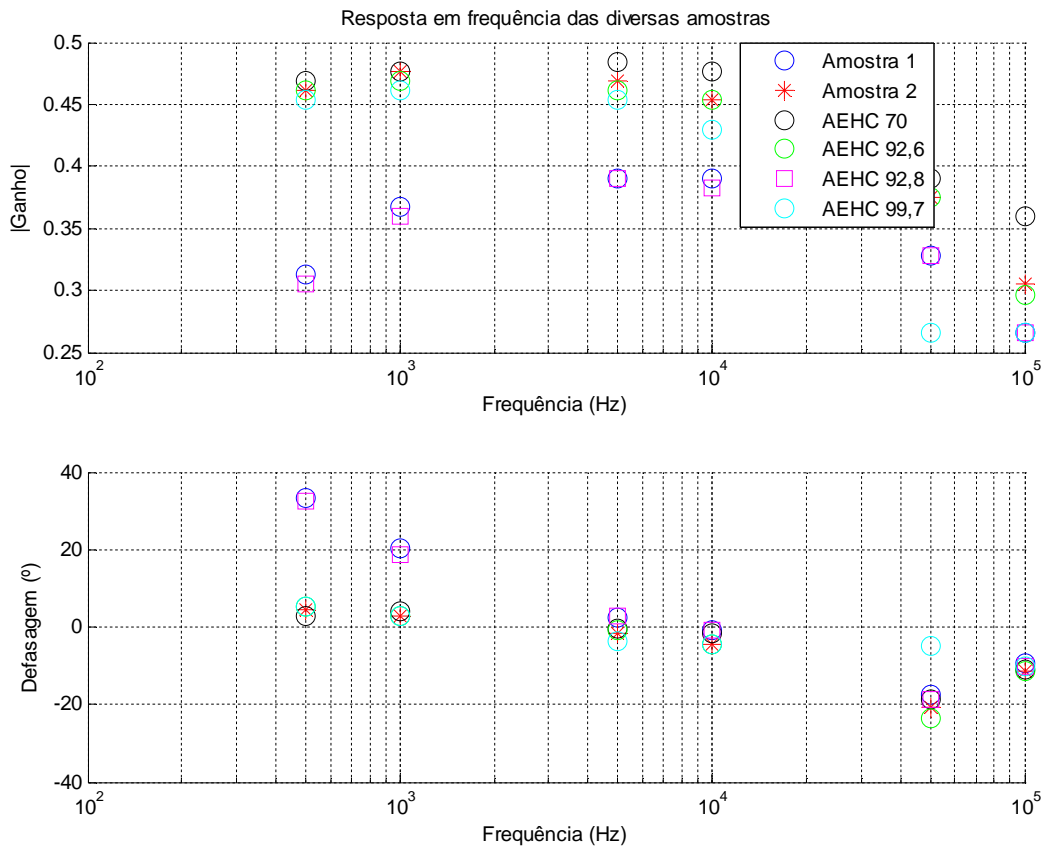


Figura 4.13 – Resposta em frequência das diversas amostras

Como pode ser visto, a faixa de operação onde o sensor indutivo apresenta o maior ganho está entre 1kHz e 10kHz. Porém os ganhos apresentados nesta faixa não correspondem às condutividades esperadas para as devidas amostras. Tal resultado é observado na faixa de 30kHz a 100kHz, como é detalhado na Figura 4.14.

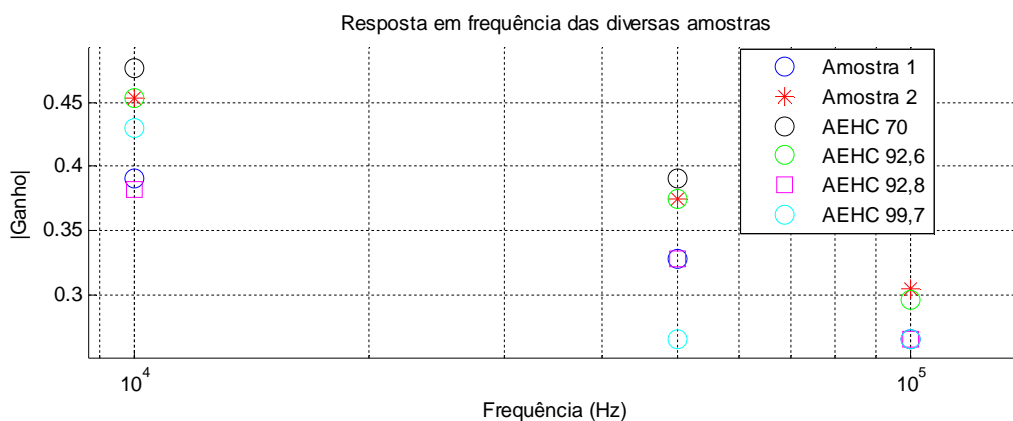


Figura 4.14 – Zoom da resposta do ganho em função da frequência (10kHz ~ 100kHz).

O AEHC 99,7° mostrou ter o menor ganho dentre as amostras analisadas. Este tipo de comportamento já era esperado devido à baixa quantidade de água presente na amostra (0,3% em massa de água), o que reduz a sua condutividade.

Na frequência de 50kHz, o sensor indutivo apresentou o mesmo comportamento para a Amostra 1 e para o AEHC 92,8°. Baseado neste resultado pode-se afirmar que o sensor indutivo identificou a mesma quantidade de água (7,2% em massa) presente nas duas amostras. O mesmo comportamento é observado até a frequência de 100kHz. Para frequências entre 10kHz e 50kHz, as duas amostras apresentaram comportamento muito semelhante.

O sensor indutivo apresentou ainda o mesmo comportamento para a Amostra 2 e para o AEHC 92,6°. Como base neste resultado pode-se afirmar que o sensor indutivo identificou a mesma quantidade de água (7,4% em massa) presente nas duas amostras. O mesmo

comportamento é observado entre as frequências de 10kHz a 50kHz. Para frequências de 50kHz a 100kHz as duas amostras apresentaram comportamento similar.

O AEHC 70,0° apresentou o maior ganho dentre as amostras utilizadas. Este comportamento era esperado devido à maior quantidade de água presente na amostra (30% em massa), o que aumenta a sua condutividade.

Foi observada também uma grande variação entre as fases dos sinais obtidos na bobina sensor e na bobina *drive*, como mostra a Figura 4.13.

Apesar do comportamento de cada amostra variar sensivelmente com a frequência não foi possível observar um padrão no mesmo. Por este motivo não é possível analisar a resposta da desfagem pela frequência de forma independente. Para fazer esta análise calculou-se o ganho complexo do sensor indutivo para cada uma das amostras na frequência de 50kHz, como visto na Figura 4.14.

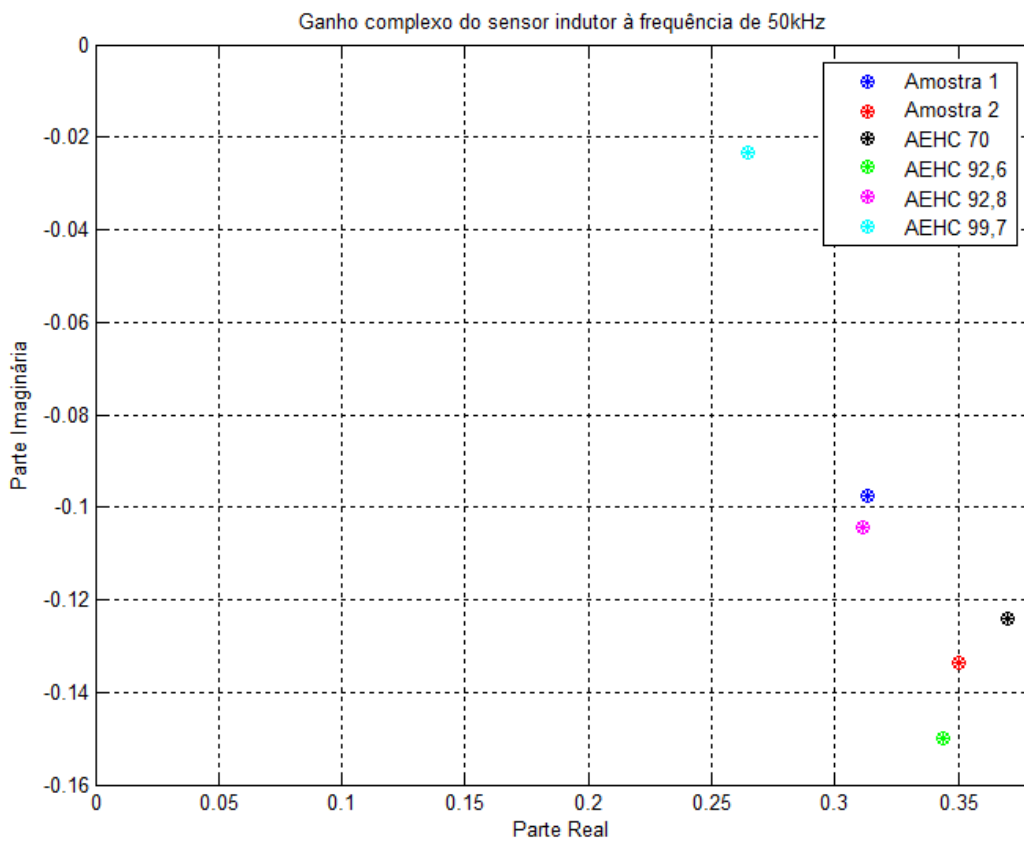


Figura 4.15 – Ganho complexo do sensor à frequência de 50kHz.

A parte real do ganho complexo apresenta um comportamento similar ao do módulo do ganho mostrado na Figura 4.14.

Os resultados são vistos mais claramente quando se estabelece uma relação entre o ganho do sensor e a concentração de AEHC nas amostras analisadas. Esta relação é vista na Figura 4.16:

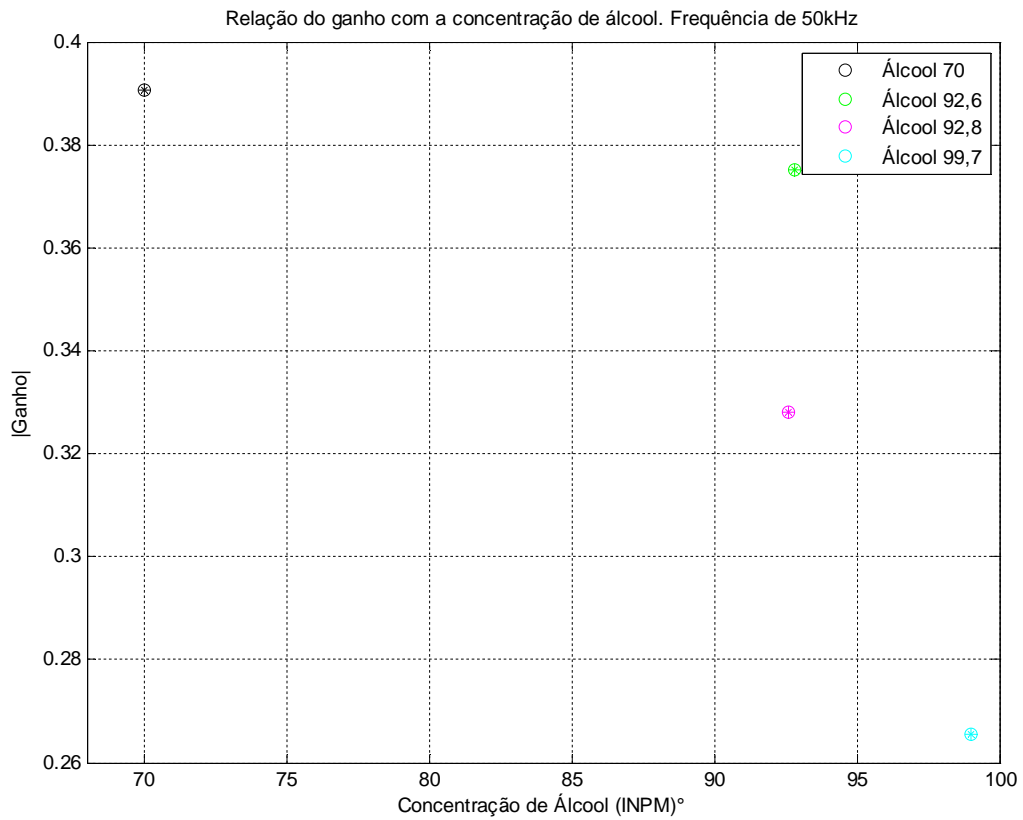


Figura 4.16 – Relação entre o ganho do sensor e a concentração de AEHC nas amostras analisadas.

5. Conclusões e Sugestões

A partir das análises apresentadas no Capítulo IV, conclui-se que o sensor pode estimar de forma aceitável a quantidade de água presente nas diversas amostras, mesmo para pequenas variações de concentração.

Observou-se que de 30kHz a 100kHz o sensor apresentou o ganho esperado para cada amostra, sendo esta considerada a faixa ideal de operação do mesmo. Os ângulos de fase dos sinais adquiridos na bobina sensor não mostraram relação direta com a condutividade elétrica das amostras.

Paralelamente a esse projeto, foi desenvolvido um sensor capacitivo com a mesma finalidade [11]. Todos os ensaios foram feitos com as mesmas amostras de álcool e sob as mesmas condições de medição. Assim como o sensor indutivo aqui proposto, esse sensor capacitivo também indicou que as amostras de combustíveis adquiridas nos postos de abastecimento estavam dentro das concentrações de AEHC determinadas pela ANP [2]. Este resultado complementar pode ser utilizado como uma forma de validação dos resultados obtidos.

Uma sugestão para trabalhos futuros baseados neste sensor indutivo seria uma montagem mais cuidadosa das bobinas. Seja utilizando um núcleo de dimensões maiores, seja utilizando um fio de seção menor (aumentando o número total de espiras), tal procedimento

deve ser feito de maneira mais precisa. Talvez a compra de uma bobina pronta seja uma solução adequada.

O recipiente para imersão do sensor poderá conter uma quantidade menor de ar, para evitar a contaminação da amostra com a umidade presente no ar. Ou ainda, este poderia ser um recipiente mais fino, reduzindo a área de contato da amostra com o ar.

A disponibilidade de mais amostras com concentrações previamente conhecidas seria de grande ajuda, pois os gráficos ficariam muito mais claros e a calibração do sensor seria muito mais precisa. Além disso, a utilização de um densímetro seria um método de verificação para os ensaios realizados.

Como parte da aplicação prática deste projeto, o sensor pode ser integrado a um condicionador de sinais e a um DSP que realizaria todos os cálculos de ganho e seria capaz de atestar a qualidade de uma determinada amostra.

6. Referências Bibliográficas

[1] **Sonegação fiscal na venda do álcool combustível representa perdas de cerca de R\$ 1 bilhão por ano aos cofres públicos.** ETICO.org.br. Disponível em: <mms://wm-sgr-ondemand.globo.com/_aberto/sgr/1/cbn/2009/colunas/etica_091214.wma>. Acesso em 28 Fev. 2010.

[2] **Portaria N° 2 da ANP**, de 16 de Janeiro de 2002.

[3] ABNT NBR, **Álcool etílico e suas misturas com água – Determinação da massa específica e do teor alcoólico – Método do densímetro de vidro.** ABNT NBR 5992, Segunda Edição.

[4] **Electronic/Inductors**, Wikipedia, Disponível em:

<<http://en.wikibooks.org/wiki/Electronics/Inductors>>. il. color. Acesso em: 18 Fev. 2010.

[5] **Fundamental Principal of Electricity**, EP University. Disponível em

<<http://www.epuniversity.org/tech/elec.html>>. Acesso em 28 Fev. 2010

[6] **Electrical Conductivity**, Wikipedia. Disponível em:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_conductivity>. Acesso em: 22 Fev. 2010.

[7] ABNT NBR, **Determinação da condutividade elétrica.** ABNT NBR 10547, Segunda Edição.

[8] **Water Conductivity**, Lenntech – Water Treatment Solution. Disponível em:

<<http://www.lenntech.com/applications/ultrapure/conductivity/water-conductivity.htm>>.

Acesso em: 28 Fev. 2010.

[9] DEMAW, D. **Ferromagnetic Design and Applications Handbook**. Prentice Hall, 1996.

ISBN-10: 0133140881. ISBN-13: 978-0133140880.

[10] USBERCO, J. **Química: Química Geral – Volume 1**. Editora Saraiva, 2003.

[11] LACERDA A. S., “**Desenvolvimento de um sensor capacitivo para medição de adulteração de álcool combustível**”, Março de 2010, Dissertação de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

[12] **Ferrite Core**, Wikipedia. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Ferrite_core>.

Acesso em: 21 Fev. 2010.

[13] **Aço-silício de grão orientado**, Wikipedia. Disponível em:

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Aço-silício_de_grão_orientado>. Acesso em: 21 Fev. 2010.

[14] **Soft ferrite**, Wikipedia. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Soft_ferrite>.

Acesso em: 21 Fev. 2010.

[15] **W3NQN's Passive CW Audio Filter Kit**. Somente il. color. Disponível em:

<<http://w3nqn.com/build.html>>. il. color. Acesso em: 23 Fev. 2010.

[16] RAMOS, A.C.M.; FILHO, N.R.A. Desenvolvimento de metodologias analíticas para determinação de Adulteração em álcool. In: Reunião Anual da SBPC, 2006, Florianópolis.

Resumos Eletrônicos. Disponível em:

<http://www.sbpcnet.org.br/livro/58ra/JNIC/RESUMOS/resumo_3905.html>. Acesso em: 18 Jan. 2010.

Anexo A – Folha de ensaios da Thornton

THORNTON ELETRONICA

RELATORIO DE AMOSTRAS

Numero: 112305

Cliente: LUIZ EDUARDO

DATA: 17/06/2009

Itens: 2

Item: 1

Quantidade: 2 Pecas

P/N: 21515-5

Descricao: NT-27/16/12-6000-TH50 (C/P)

< Propriedades Eletricas > Valor do AL (nH)

- Condicoes de Teste

Freq.: 10 kHz

Ind.: 0,25 mT

Equipamento: HP-4284A

AL espec.: 6000 nH

+ 25 - 25 %

- Valores Medidos:

5574 Min

5666.0 Med

5758 Max

< Propriedades Mecanicas >

Inspetor: JANE

Cotas em (mm)

	Cota A	Cota B	Cota C
Esp.	27.00	16.00	12.00
Tol. +	0.70	0.50	0.50
-	0.70	0.50	0.50

- Valores Medidos:

27.31 min

16.01 min

12.12 min

27.36 med

16.03 med

12.13 med

27.42 max

16.06 max

12.14 max

Inspetor: RENATA