

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Frederico Ferreira Alves Pinto

Estudo e desenvolvimento de condutímetros.

Florianópolis
2022

Frederico Ferreira Alves Pinto

Estudo e desenvolvimento de condutímetros

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Adroaldo Raizer, Dr.

Florianópolis
2022

Ficha de identificação da obra

Pinto, Frederico Ferreira Alves
Estudo e desenvolvimento de condutímetros / Frederico
Ferreira Alves Pinto ; orientador, Adroaldo Raizer, 2022.
69 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Qualidade da água. 3.
Condutividade. 4. Salinidade. I. Raizer, Adroaldo. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

Frederico Ferreira Alves Pinto

Estudo e desenvolvimento de condutímetros

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 14 de abril de 2022.

Prof. Miguel Moreto, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Adroaldo Raizer, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Tiago Drummond Lopes, Me
Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais, pois sem seu amor e apoio não conseguiria ter sequer cursado a faculdade. Espero que possa trazer algum orgulho para eles.

Até a conclusão deste trabalho, ao menos 650 mil brasileiros e brasileiras morreram na pandemia dos anos 2020 – 2022. Este trabalho não tem qualidade suficiente para servir de homenagem para todos os mortos, mas espero que se por algum acaso consiga sobreviver ao teste do tempo; saiba você, homem ou mulher do futuro, que nunca houve tamanha carnificina neste país. Espero que os que se aliaram ao vírus, através da ação ou inação, tenham encontrado justiça e que os mortos tenham encontrado a paz que merecem.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Professor Raizer por ter me aceito como orientando, e a equipe do MagLab (em especial ao Dalton e ao Mikael) pela paciência e por terem me ensinado a usar os equipamentos.

RESUMO

Um dos fatores mais importantes para o estudo de águas marinhas e continentais é sua salinidade, frequentemente medida por sua condutividade. A salinidade também é um parâmetro importante para análise da qualidade da água e outros processos industriais. No curso deste trabalho, buscou-se construir dois medidores de condutividade da água com materiais comuns e avaliar seu desempenho, utilizando condutímetros comerciais como referência.

Palavras-chave: Condutividade. Qualidade da água. Salinometria.

ABSTRACT

Salinity is often one of the most important parameters used in oceanography and limnology and often electrical conductivity is used as its proxy. Salinity and conductivity are also used in water quality analysis and in the control of a host of industrial processes. The work presented here aimed to show the construction of two different conductivity meters and to evaluate their behaviour using commercial conductivity meters.

Keywords: Conductivity. Salinometry. Water quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Condutividades de alguns tipos de água.....	29
Figura 2 - Diagrama de um condutímetro de contato.....	32
Figura 3 - Diagrama do sistema.....	33
Figura 4 - Sensor de condutividade comercial.....	33
Figura 5 - O sensor de condutividade indutivo com dois transformadores. (a) Estrutura. (b) Circuito equivalente.....	34
Figura 6 - Superior: função de transferência em função da frequência (Hz). Meio: função de transferência em função de R_w para diversas indutâncias. Inferior: magnitude da função de transferência em função de R_a (Ω). $R_A = 1 \Omega$, $L = 1 \text{ mH}$, $n_1 = n_2 = 50$ espiras.....	35
Figura 7 - Circuito equivalente do transdutor de dois indutores.....	36
Figura 8 - Terrômetro de garra e sua estrutura.....	37
Figura 9 - (a) Circuito com um indutor. (b) Circuito com dois indutores acoplados. R_{cu} é a resistência do cobre, R_e representa as perdas, C_p representa a capacitância das bobinas, C_e modela as correntes de deslocamento e L é a indutância da(s) bobinas.....	38
Figura 10 - Etapas do projeto.....	40
Figura 11 - Sensores utilizados.....	41
Figura 12 - Esquerda: USB B. Meio: conector parcialmente desfeito. Direita: sensor pronto.....	43
Figura 13 - Circuito equivalente do sensor com eletrodos.....	43
Figura 14 - Teste para determinação do coeficiente geométrico do transdutor de eletrodos. $F = 1 \text{ kHz}$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	45
Figura 15 - Teste do transdutor de eletrodos sendo executado.....	45
Figura 16 - Condutância em função da concentração de sal. $V_{in} = 7.12 \text{ V}_{rms}$, $F = 1 \text{ kHz}$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	47
Figura 17 - Esquerda: <i>Vector Network Analyzer</i> . Direita: Ponte RLC.....	51
Figura 18 - Exemplo de medida feitas utilizando o VNA.....	51
Figura 19 - Utilização da ponte RLC para medir parâmetros do protótipo.....	52
Figura 20 - Curva de permeabilidade em função da frequência de um dos núcleos. $N = 4$ voltas.....	53
Figura 21 - Visão isométrica do modelo impresso.....	54
Figura 22 - (A) e (B): indutores e molde. (C) e (D): protótipo pronto.....	55
Figura 23 - Indutâncias do protótipo.....	56
Figura 24 - Curva da condutividade em função da transcondutância. $F = 20 \text{ kHz}$, $R_a = 1 \text{ k}\Omega$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_{in} = 7.1 \text{ V}_{rms}$	57
Figura 25 - Transcondutância em função da concentração de sal. $V_{in} = 7.12 \text{ V}_{rms}$, $F = 20 \text{ kHz}$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação das águas de acordo com o CONAMA.....	22
Quadro 2: Classificação das águas de acordo com o USGS.....	22
Quadro 3 - Parâmetros dos sensores comerciais.....	33
Quadro 4 - Parâmetros do indutor selecionado.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AmpOp Amplificador Operacional

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente

CTD *Conductivity, Temperature and Depth*

ICES *International Council for the Exploration of the Sea*

ISO *International Organization for Standardization*

TEOS-10 *Thermodynamic Equation of Seawater – 2010*

UNESCO *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*

USGS *United States Geological Survey*

SUMÁRIO

1 Introdução.....	25
1.1 Objetivos.....	26
1.1.1 Objetivo Geral.....	26
1.1.2 Objetivos Específicos.....	26
2 Desenvolvimento.....	27
2.1 Introdução.....	27
2.2 Revisão bibliográfica.....	27
2.2.1 Condutividade.....	27
2.2.2 A história da salinidade e sua relação com a condutividade.....	28
2.2.3 Parâmetros eletroquímicos da água.....	31
2.2.3.1 Condutividade.....	31
2.2.3.2 Concentração de sólidos ou sais.....	31
2.2.4 Transdutores de condutividade.....	32
2.2.4.1 Condutímetros de contato ou com eletrodos.....	33
2.2.4.2 Indutivos com núcleo magnético toroidal.....	34
2.2.4.3 Indutivos baseados em correntes de Foucault.....	39
2.3 Conclusão.....	41
3 Metodologia e materiais.....	43
3.1 Introdução.....	43
3.2 Sensores comerciais.....	43
3.3 Sensor com eletrodos.....	45
3.3.1 Fabricação dos eletrodos.....	45
3.3.2 Construção do transdutor.....	45
3.3.3 Testagem e validação.....	46
3.3.3.1 Determinação da constante da célula.....	47
3.3.3.2 Medidas utilizando concentração de sal.....	49
3.3.4 Sobre o coeficiente de temperatura.....	50
3.4 Sensor Indutivo.....	51
3.4.1 Seleção de núcleos.....	51
3.4.1.1 Tamanho.....	51
3.4.1.2 Frequência.....	51
3.4.1.3 Permeabilidade.....	52
3.4.1.4 Resultados.....	55
3.4.2 Construção do invólucro.....	56
3.4.3 Testagem e validação.....	58

3.4.3.1 Medição dos parâmetros do circuito.....	58
3.4.3.2 Teste dielétrico e de resistência à água.....	59
3.4.3.3 Determinação da constante da célula.....	60
3.4.3.4 Testes utilizando concentração de sal.....	61
4 Conclusão.....	63
5 Referências.....	67
APÊNDICE A.....	69

1 INTRODUÇÃO

Os oceanos e seus ecossistemas constituem a maior parte da Terra. Apesar disso, grande parte de sua biodiversidade e de seu funcionamento são desconhecidos. A exploração dos aspectos bióticos e abióticos dos mares vem se acelerando, juntamente com o avanço da tecnologia.

Modelos oceanográficos modernos são tão complexos e diversos quanto o próprio mar, mas quase todos se baseiam em medidas de temperatura, pressão e salinidade. Com o conhecimento destas três variáveis, é possível estimar o movimento das correntes marinhas e distinguir massas de água (PAWLOWICZ, 2013).

A salinidade também é utilizada no estudo de águas continentais na forma de um indicador de qualidade, como mencionado por Alves (2016). Além disso, a salinidade também é importante na hidroponia e agricultura, onde frequentemente é utilizada para medir a concentração de fertilizantes e outros insumos, além de qualificar água utilizada na irrigação e o próprio solo.

No Brasil por exemplo, a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), nº 357, de 7 de março de 2015 (Brasil, 2015), utiliza a salinidade para classificar águas entre doces, salobras ou salinas.

A salinidade pode ser medida utilizando métodos elétricos, químicos, gravimétricos ou ópticos, mas, para medições autônomas de longo prazo, as elétricas são mais apropriadas. De acordo com a ISO 7888 (1985), as medidas elétricas de salinidade podem ser feitas de dois modos, resistivo ou indutivo.

O método resistivo é o mais direto e constitui em mergulhar dois ou quatro eletrodos na amostra, aplicar uma tensão alternada entre os terminais e medir a corrente no circuito. Este método é o mais indicado para medidas em laboratório, pois pode ser muito preciso e os eletrodos precisam ser limpos a cada medida, algo que impossibilita seu uso em aplicações oceanográficas e industriais, pois a exposição constante a ambientes hostis ou sujos iria descaracterizar o sensor.

As medidas indutivas baseiam-se na indução de correntes elétricas na amostra. O que geralmente é alcançado com pequenos transformadores ou bobinas. Isso faz esse tipo de sensor ser mais apropriado para uso contínuo em

locais externos ou agressivos já que é possível proteger os componentes elétricos do contato com o fluido.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Contribuir para o entendimento do funcionamento e construção de condutímetros através da construção de protótipos dos dois tipos mais comuns e revisão da literatura revelante.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Projetar e construir um condutímetro indutivo com dois núcleos magnéticos.
- Projetar e construir um condutímetro de eletrodos.
- Revisar a literatura relevante e explorar o funcionamento dos condutímetros.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 INTRODUÇÃO

Esta seção inicia-se com uma breve revisão bibliográfica dos temas importantes ao desenvolvimento desse trabalho, desde as definições e história das unidades relevantes, até os tipos de sensores utilizados comercialmente.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.2.1 Condutividade

A relação direta de proporcionalidade entre a tensão aplicada em um condutor e a corrente que circula por ele foi descrita por Ohm (1827). Esta relação, é conhecida hoje como Lei de Ohm e é representada em (1):

$$V = R \cdot I \quad (1)$$

V é a tensão em Volts, I é a corrente em Amperes e R é uma constante de proporcionalidade, denominada de resistência elétrica, medida em Ohms.

Diferentes materiais em diferentes formas possuem resistências distintas. A constante que, para um mesmo material, indica quão forte é sua resistência ao fluxo de corrente, é chamada de resistividade e é medida em Ohms metro ($\Omega \cdot m$) e usualmente representada por ρ . A relação entre resistência e resistividade, para um corpo de seção transversal uniforme, é a constante de proporcionalidade K (medida em metros), como indicado em (2).

$$R = \rho \cdot K \quad (2)$$

Esta relação também pode ser estendida para problemas com campos e densidade de corrente não uniformes, como é feito no estudo de líquidos, e problemas com geometria complexa.

Também existem duas unidades, recíprocas às mencionadas anteriormente, conhecidas por condutância e condutividade. São medidas em Siemens (S) e

Siemens por metro (S / m), respectivamente. São diretamente relacionadas com R e ρ conforme (3) e (4).

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{\rho \cdot K} = \frac{\sigma}{K} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

G é a condutância e σ é a condutividade.

2.2.2 A história da salinidade e sua relação com a condutividade

O conceito de salinidade é bastante intuitivo, afinal de contas todos sabem discernir entre água salgada e água potável, mas sua história e unidades são um pouco tortuosas. As explicações mais antigas sobre a salinidade da água (que se tem notícia) foram feitas pelos gregos do período clássico. Aristóteles relata duas explicações:

(...) Alguns de entre eles dizem que, quando a terra fica aquecida pelo sol, forma-se como que um suor; por isso, também é salgado, pois o suor também é salgado. Outros dizem que a terra é causa da salinidade: assim como o que se filtra através da cinza se torna salgado, do mesmo modo também ele é salgado porque se lhe mistura terra com essa característica. (ARISTÓTELES, p.94).

De acordo com Shkvorets (2022), essa confusão perdurou até mesmo através das revoluções científica e industrial. Ele conta que, inicialmente, tentou-se usar a quantidade de resíduos sólidos provenientes da evaporação de amostras como unidade de salinidade, mas, na prática, era extremamente difícil devido à higroscopia dos sólidos resultantes e sua variabilidade.

Morcos (2002) relata que foi através dos trabalhos de Knudsen, Sørensen e Jacobsen, na virada do século passado, sob os auspícios do *International Council for the Exploration of the Sea* (ICES), que se estabeleceu um método preciso de

determinação de salinidade. Este método baseava-se na titulação¹ de amostras com nitrato de prata e permitiu definir a salinidade em função da quantidade de cloro, brometo e iodo na amostra. Essa primeira definição, e subseqüentes ajustes, continuou sendo a definição usada de fato para formulação de amostras padrão, tabelas hidrográficas e na comparação de resultados até o fim dos anos 70.

Shkvorets (2022) conta que, apesar do uso da eletricidade para caracterização de água marinha ter surgido junto de nosso conhecimento da dissociação iônica, o uso generalizado de salinômetros eletrônicos teve de esperar o início da miniaturização eletrônica nos anos 50. Eles facilitaram medidas oceanográficas ao permitir a integração de vários sensores em sistemas CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*), mas complicaram a comparação de resultados, pois as escalas de salinidade existentes eram baseadas em titulação.

Esses problemas na comparação e repetibilidade de medidas foram aliviados em 1978, quando a Escala Prática de Salinidade foi proposta. Essa escala foi um produto de vários grupos internacionais e visou, dentre outras coisas:

- Escolher um padrão de condutividade elétrica com o qual todos os outros padrões futuros poderiam ser comparados. A solução escolhida foi uma baseada em Cloreto de Potássio e água destilada, a 15 °C.
- Determinar uma relação entre a escala antiga de salinidade, a condutividade da solução e a pressão atmosférica para várias temperaturas.
- Determinar o efeito da pressão na condutividade da água marinha.
- Consolidar os resultados em um conjunto de equações que permitam o cálculo da salinidade a partir de medidas de condutividade, temperatura e pressão.

Os resultados desses esforços encontram-se em Lewis (1980) e UNESCO (1981). Esse conjunto de unidades e equações de estado durou por mais três décadas, até ser suplantada pela salinidade absoluta descrita no *Thermodynamic Equation of Seawater-2010* (TEOS-10), em 2010, que descreve a salinidade em termos da fração de massa de sólidos diluídos (aparentemente percorrendo um ciclo completo). Baseado no padrão TEOS-10, a salinidade deixa de ser um variável

¹ Titulação é uma técnica de química analítica onde um reagente, com volume e concentração conhecidos, reage com uma amostra de concentração desconhecida. O exemplo mais comum é a titulação ácido base com um indicador de pH (geralmente fenolftaleína). Um exemplo didático da titulação de água do mar é providenciado por *Nation Of Our Hobbies* (2022).

medida (a partir de condutividade, temperatura e pressão) e passa a ser uma variável derivada a partir de fórmulas bem complexas e ainda imaturas.

Por essas razões, a escala prática de salinidade e a condutividade elétrica continuam sendo usadas largamente no campo da oceanografia, biologia e química para caracterização de amostras de água. Uma explicação mais detalhada é (paradoxicamente) encontrada no manual da TEOS-10:

There are three very good reasons for continuing to store Practical Salinity rather than Absolute Salinity in such data repositories. First, Practical Salinity is an (almost) directly measured quantity whereas Absolute Salinity is generally a derived quantity. That is, we calculate Practical Salinity directly from measurements of conductivity, temperature and pressure, whereas to date we derive Absolute Salinity from a combination of these measurements plus other measurements and correlations that are not yet well established. Practical Salinity is preferred over the actually measured in situ conductivity value because of its conservative nature with respect to changes of temperature or pressure, or dilution with pure water.

Second, it is imperative that confusion is not created in national data bases where a change in the reporting of salinity may be mishandled at some stage and later be misinterpreted as a real increase in the ocean's salinity. This second point argues strongly for no change in present practice in the reporting of Practical Salinity (PS) in national data bases of oceanographic data.

Thirdly, the algorithms for determining the "best" estimate of Absolute Salinity of seawater with non-standard composition are immature and will undoubtedly change in the future, so we cannot recommend storing Absolute Salinity in national data bases. (IOC,2010,p.4).

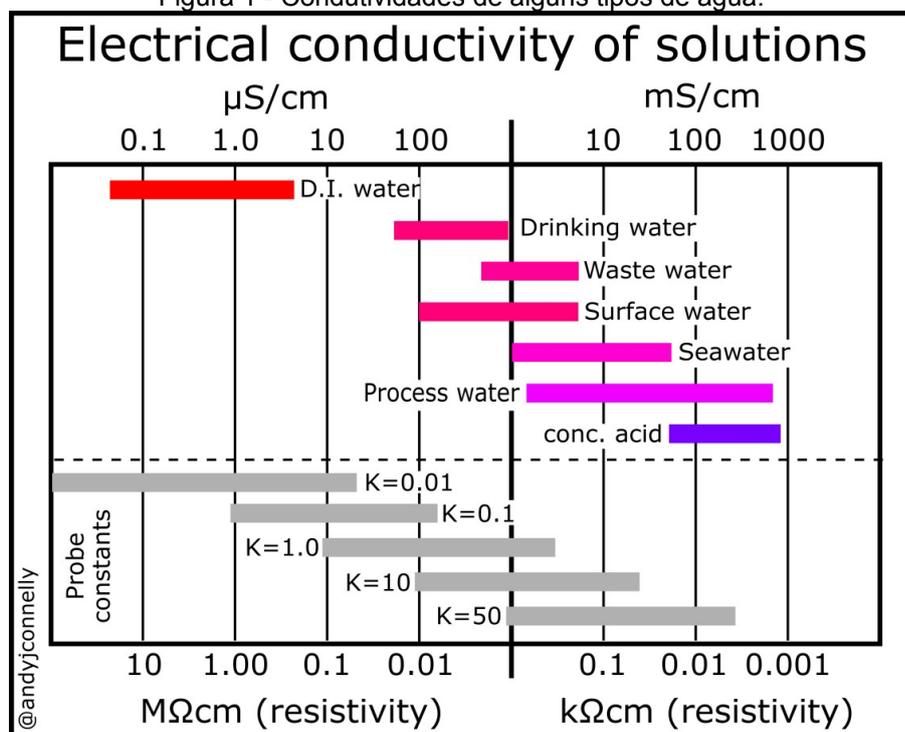
Como o objetivo desse trabalho é a construção e análise de um condutímetro, e levando em conta a confusão histórica a respeito das unidades de salinidade, o foco deste trabalho se dará especialmente em medidas de condutividade (em S/m) e g/kg (ou por mil) por razões metrológicas detalhadas na seção 3.2.

2.2.3 Parâmetros eletroquímicos da água

2.2.3.1 Condutividade

A condutividade de águas encontradas na natureza e em processos industriais pode variar por seis ordens de grandeza, conforme mostra a Figura 1. Por causa disso, os transdutores têm de ser feitos com uma constante construtiva apropriada para a escala desejada. Neste trabalho, buscou-se construir protótipos capazes de realizar medidas entre a água potável e a água do mar.

Figura 1 - Condutividades de alguns tipos de água.



Fonte: Connely (2015).²

2.2.3.2 Concentração de sólidos ou sais

Assim como a condutividade, a quantidade de sólidos dissolvidos (geralmente sais) também atravessa algumas ordens de grandeza. A Resolução CONAMA nº 357

² Começando de cima e lendo a figura da esquerda para direita, se lê: condutividade elétrica de soluções, água destilada, água potável, água de resíduos ou esgoto, água de superfície, água do mar e ácido concentrando e resistividade. Tradução nossa.

(Brasil, 2015) divide as águas em função da concentração de sólidos em parte por mil (‰) conforme o Quadro 1.

Quadro 1: Classificação das águas de acordo com o CONAMA.

Classificação	Concentração de sal (‰)
Doce	Menor que 0,5
Salobra	Entre 0,5 e 30,0
Salina	Maior que 30,0

Fonte: CONAMA (2015).

Já o *United States Geological Survey* (USGS) classifica as águas conforme o Quadro 2.

Quadro 2: Classificação das águas de acordo com o USGS.

Classificação	Concentração de sal (‰)
Potável	Menos que 1
Levemente salina	Entre 1 e 3
Moderadamente salina	Entre 3 e 10
Altamente Salina	Entre 10 e 35

Fonte: USGS (2018).

As definições são similares e importantes pois a água proveniente de processos industriais deve respeitar os limites do corpo que a recebe, pois variações de salinidade e temperatura podem causar desequilíbrios para o ecossistema local. Nos Estados Unidos, os maiores consumidores de água salina são as usinas termoelétricas, que são frequentemente construídas em proximidade ao mar para facilitar o uso de água do mar em seu resfriamento.

2.2.4 Transdutores de condutividade

Como mencionado anteriormente, os transdutores de condutividade se dividem em dois tipos. Suas diferenças e princípios de funcionamentos serão explicados em mais detalhes nas próximas seções. Em dispositivos comerciais, ambos geralmente são, providos de termômetros para corrigir variações causadas pela temperatura.

2.2.4.1 Condutímetros de contato ou com eletrodos

Esse tipo de condutímetro é o que apresenta a relação mais direta com a variável medida. Constitui-se, no caso mais simples, de dois eletrodos de material condutivo e resistente (geralmente platina, aço, ouro ou carbono). Ao aplicar uma tensão alternada nos terminais e mergulhar os eletrodos num líquido, uma corrente fluirá de um eletrodo ao outro por meio do líquido. A resistência do líquido, R_w , pode então ser descrita por (1). Com isso, a condutividade da amostra dá-se conforme (5).

$$\sigma = \frac{K}{R_w} \quad (5)$$

R_w é a resistência entre os terminais e K é uma constante de proporcionalidade.

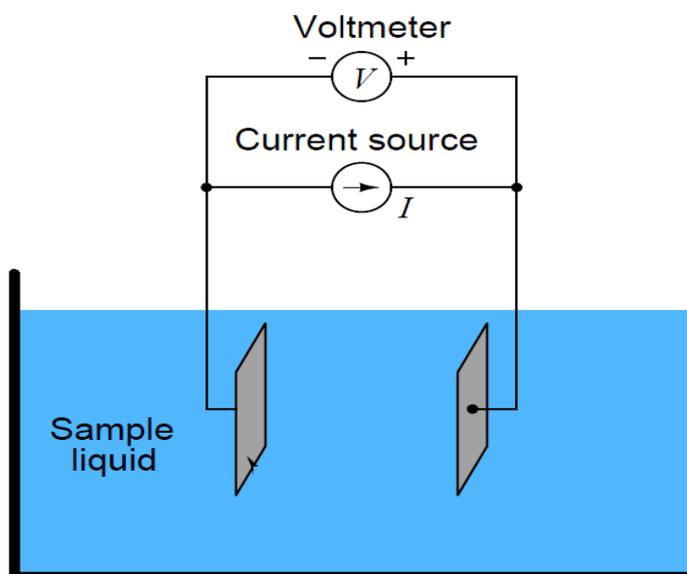
O cálculo analítico de K é difícil, pois o campo elétrico não é confinado somente entre as placas (e raramente elas são planas). Emerson Process Management (2010) recomenda utilizar soluções padrão em conjunto com medidores “juízes” já calibrados para se obter o valor de K .

A tensão aplicada nos terminais deve ser alternada, para evitar a polarização da substância. Na prática, a frequência da tensão aplicada, depende do material, mas pode variar de 20 Hz até 2 MHz segundo Bešter-Roga (2006). Dispositivos comerciais geralmente fazem medidas em 1 kHz.

A resistência medida entre os eletrodos, então, pode ser utilizada numa ponte de Wheatstone³ (ou outro medidor de impedância) para se obter uma medida precisa de sua resistência. A Figura 2 mostra a estrutura idealizada desse tipo de sensor. A letra G indica a condutância do líquido.

³ Circuito que permite medir uma resistência desconhecida, utilizando resistências conhecidas e um galvanômetro.

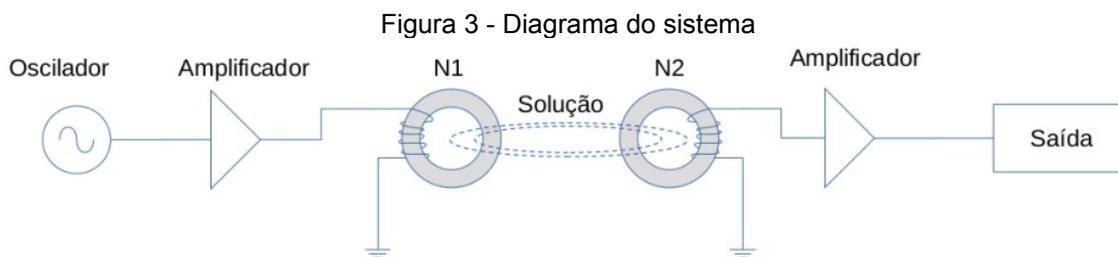
Figura 2 - Diagrama de um condutímetro de contato.



Fonte: Instrumentation Tools (2022)

2.2.4.2 Indutivos com núcleo magnético toroidal

Constitui-se de dois indutores toroidais em núcleos de alta permeabilidade colocados em proximidade. Quando imersos em um líquido condutivo e uma tensão alternada é aplicada no indutor de excitação, uma corrente iônica é induzida no líquido e acoplada no segundo indutor, conforme a Figura 3. As magnitudes dessa corrente e da resposta na saída dependem da condutividade do meio. Geralmente, esses transdutores são colocados em um encapsulamento com capacidade de resistir à pressão, água e elementos corrosivos. Um exemplo comercial é mostrado na Figura 4.



Fonte: Autor

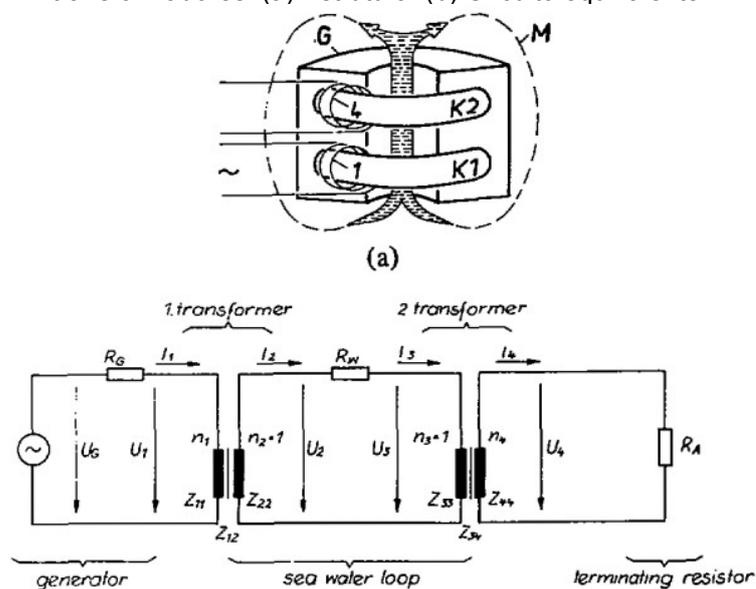
Figura 4 - Sensor de condutividade comercial.



Fonte: Aqualabo (2021).

Uma explicação de seu funcionamento é apresentada por Striggow e Dankert (1985). De acordo com eles, é possível utilizar sensores que consistem de um ou dois transformadores, mas somente o último é que tem ampla utilização. Para o diagrama da Figura 3, os autores propuseram o circuito elétrico equivalente mostrado na Figura 5.

Figura 5 - O sensor de condutividade indutivo com dois transformadores. (a) Estrutura. (b) Circuito equivalente.



Fonte: Striggow e Dankert (1985).

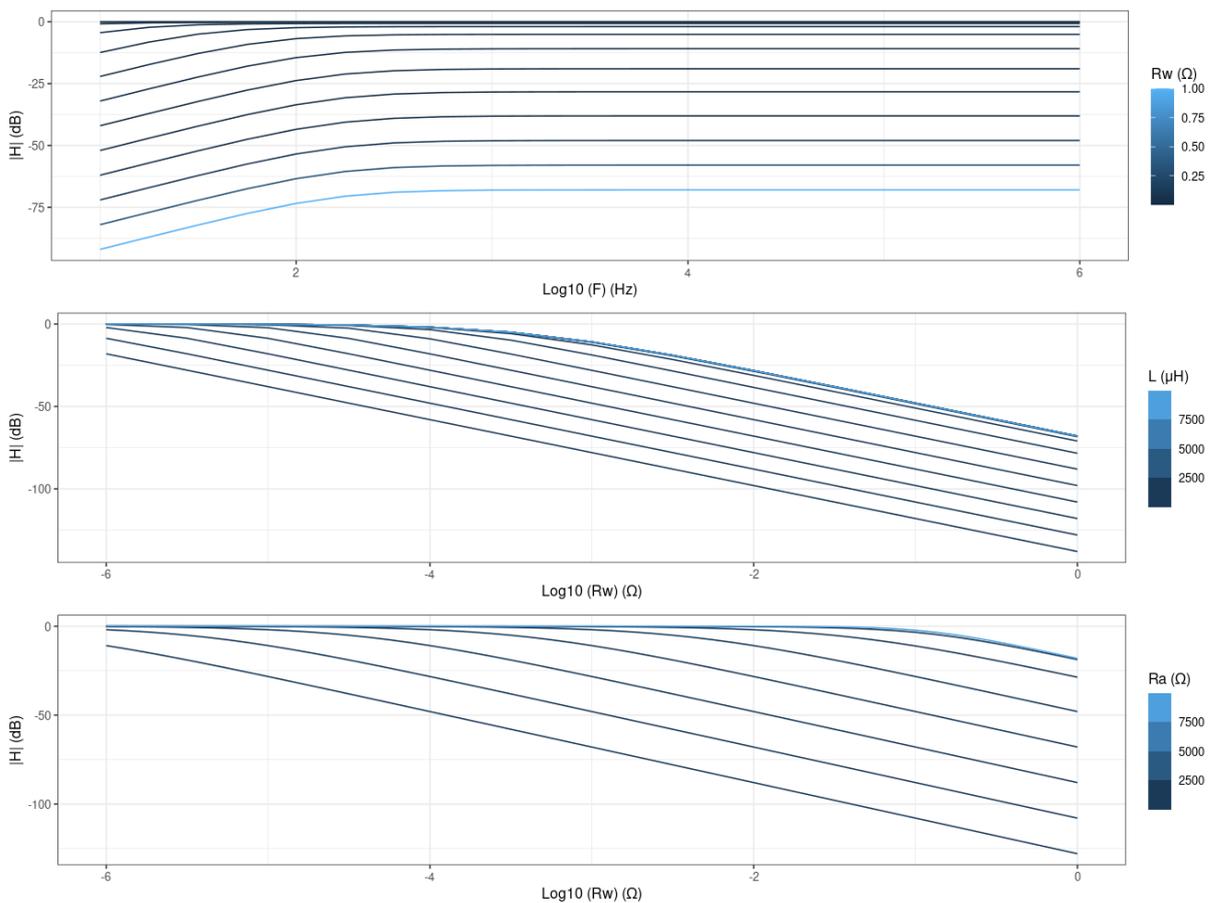
Também apresentam uma função transferência, que é descrita em (6) :

$$H = \left(\frac{n_4}{n_1} \right) \cdot \frac{1}{1 + n_4^2 \cdot R_w \cdot \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot L_{44}} \right)} \quad (6)$$

H é magnitude da razão da tensão de saída sobre a de entrada, n_4 e n_1 são o número de voltas do primeiro e do segundo transformador, respectivamente, R_W é a resistência do circuito formado no líquido, R_A é a carga no segundo transformador, ω é a frequência, L_{44} é a indutância do segundo indutor. Infelizmente, a descrição de como se chegou nesse circuito ou equação estão em Striggow e Dankert (1984), que não pôde ser acessado (não foi digitalizado e cópias físicas não foram encontradas).

É possível ver na Figura 6 que a função de transferência tem uma característica passa- alta na frequência e também aumenta com a condutância do líquido.

Figura 6 - Superior: função de transferência em função da frequência (Hz). Meio: função de transferência em função de R_W para diversas indutâncias. Inferior: magnitude da função de transferência em função de R_a (Ω). $R_A = 1 \Omega$, $L = 1 \text{ mH}$, $n_1 = n_2 = 50$ espiras.



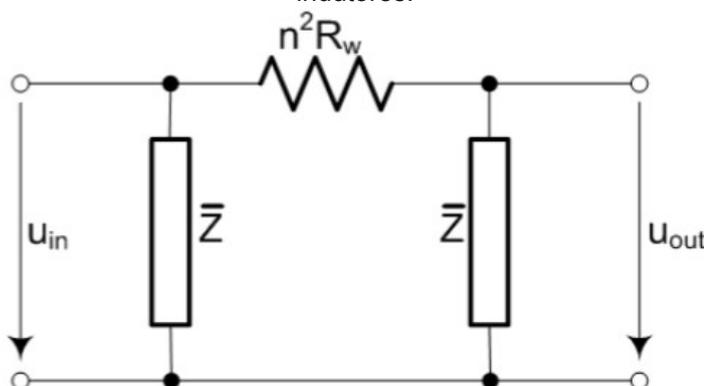
Fonte: Autor.

Já Ribeiro e Ramos (2006) apresentam uma equação simplificada, da forma mostrada em (7).

$$V_i = V_o \cdot \frac{Z}{Z + n^2 \cdot R_w} \quad (7)$$

Z é a impedância dos indutores (que são iguais), n é o número de voltas e R_w é a resistência do líquido, conforme indicado na Figura 7.

Figura 7 - Circuito equivalente do transdutor de dois indutores.



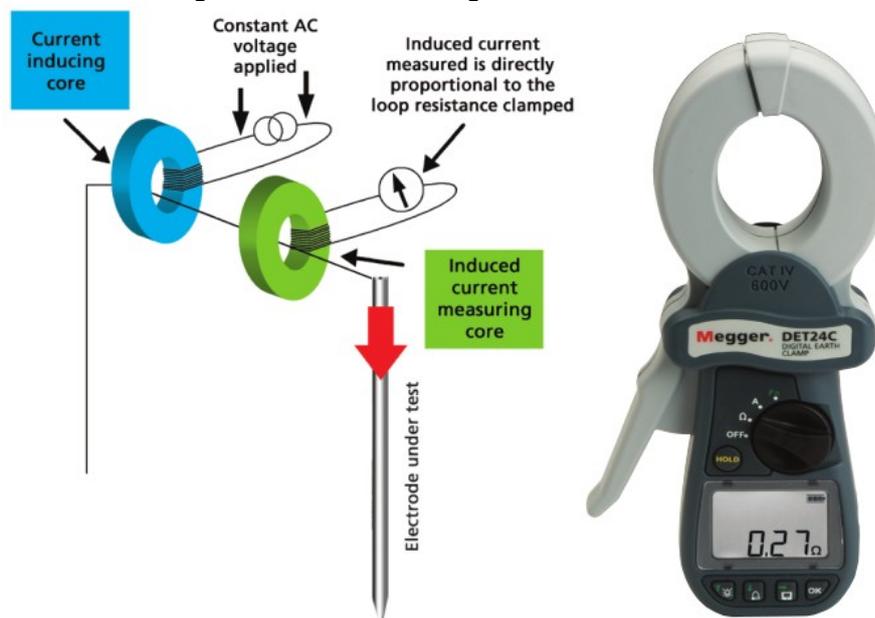
Fonte:(RIBEIRO; RAMOS, 2006)

Baseando-se em (6) e (7) e na Figura 6, é possível constatar que, para se ter a capacidade de medir a condutividade da água, que, de acordo com Connelly (2017), varia de, em média, $50 \mu\text{S/m}$ para água doce, até 6 S/m para a água do mar, o dispositivo precisa de indutores com indutância relativamente elevada.

Uma topologia similar é utilizada em circuitos de terrômetros do tipo garra. Um exemplo é mostrado na Figura 8, Este tipo de sensor geralmente serve como uma medida da qualidade do aterramento em instalações, mas seu uso é complicado pelo fato de que nem sempre se sabe como a instalação foi construída de fato.

No caso aplicado para líquidos, a corrente é induzida em um volume condutivo (Figuras 3 e 5 (a)) e não em um fio metálico.

Figura 8 - Terrômetro de garra e sua estrutura.



Fonte: Megger (2013).

2.2.4.3 Indutivos baseados em correntes de Foucault

Apesar do uso de correntes de Foucault ser bem documentado para análises metalúrgicas (TWI, 2022) e sensores de proximidade (ROACH, 1998), seu uso na análise de líquidos não é generalizado. Esses sensores constituem-se apenas de uma ou mais bobinas cilíndricas, com ou sem núcleo. Seu princípio de funcionamento baseia-se em medir as perdas e a mudança de impedância dos indutores ao se aproximarem de condutores ou serem inseridos em meios condutivos.

Recentemente, alguns designs que se baseiam em correntes de Foucault foram propostos para aplicações oceanográficas e industriais. Eles se destacam por serem mais leves, menores e de fácil construção, mas precisam de frequências maiores e instrumentação mais sofisticada para realizarem medidas.

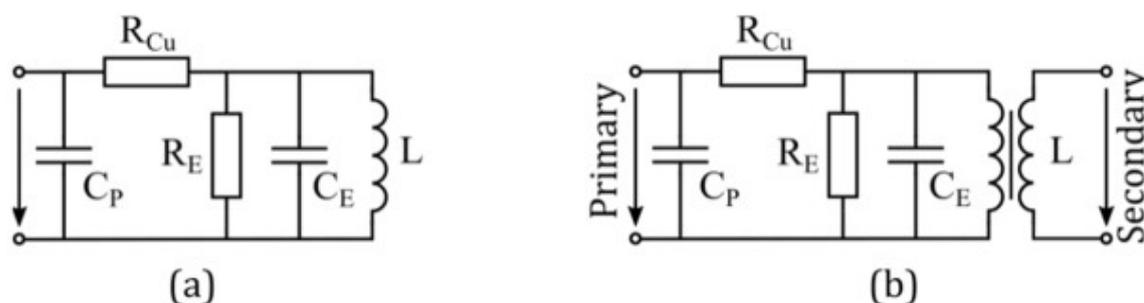
Sensores que evitem o uso de núcleos magnéticos de alta permeabilidade podem ser vantajosos, tendo em vista que esses núcleos, além de serem caros e frágeis, apresentam características que variam com temperatura e pressão e são inerentemente não lineares, conforme exposto por Striggow e Dankert (1985, p.175) e Kandur (2021, p.1).

Várias formas de sensores de corrente de Foucault foram construídas por Parra e Sendra (2011, 2015), mas seus estudos sofreram problemas de implementação, detalhados por Harms e Kern (2021). Essencialmente seus protótipos não estavam eletricamente isolados do líquido condutivo, o que induziu a resultados errôneos.

Os princípios de funcionamento desse tipo de transdutor são expostos em Harms e Kern (2021). Tanto com uma ou com duas bobinas, o dispositivo é modelado como um indutor com perdas variáveis e dependentes da condutividade do meio, como mostrado na Figura 9.

Para entender o funcionamento convém pensar em um fogão de indução. Ao ser utilizado sem nenhum recipiente condutivo a impedância das bobinas é elevada e indutiva (poucas perdas), a impedância muda e as perdas aumentam quando uma panela de alumínio é colocada sobre sua superfície (alta condutividade, muitas perdas). Já no caso de materiais pouco condutivos como ferro fundido, o aquecimento é pouco satisfatório (condutividade intermediária, perdas menores). É possível estender esse raciocínio para o caso de sensores com varias bobinas ou em líquidos.

Figura 9 - (a) Circuito com um indutor. (b) Circuito com dois indutores acoplados. R_{Cu} é a resistência do cobre, R_e representa as perdas, C_p representa a capacitância das bobinas, C_e modela as correntes de deslocamento e L é a indutância da(s) bobinas.



Fonte: Harms e Kern (2021)

Ainda não é certo que esse tipo de sensor se torne dominante nas medidas de condutividade nos campos oceanográficos, mas eles já podem ser utilizados em aplicações industriais, como mostraram Li e Chiang (2016), ao construir um circuito integrado para analisar a qualidade de leite.

2.3 CONCLUSÃO

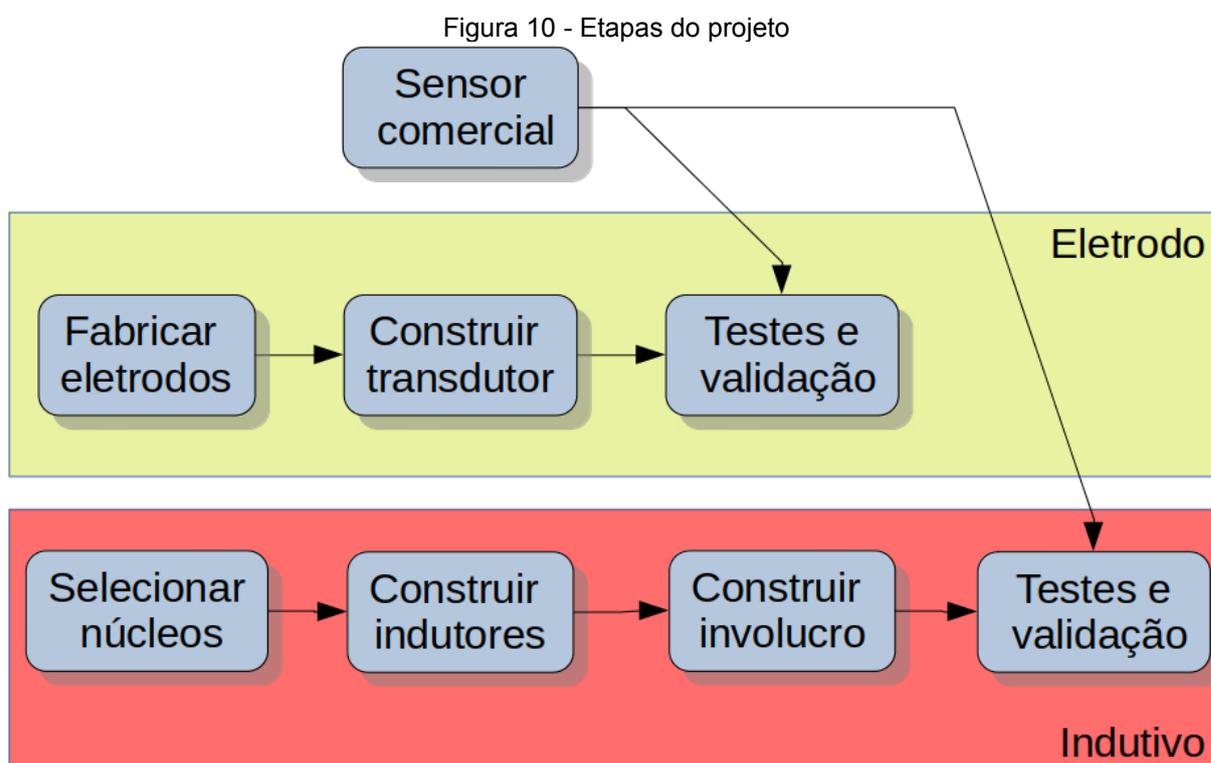
Tendo em vista o exposto por Striggow e Dankert (1985) e levando em conta que a maioria dos dispositivos comerciais são do tipo com dois indutores, seu estudo foi o objetivo principal do trabalho. Além dele, também foi investigada a construção de um sensor tradicional de eletrodos para efeitos de comparação e curiosidade científica.

3 METODOLOGIA E MATERIAIS

3.1 INTRODUÇÃO

Ao contrário dos sensores de eletrodos, informações a respeito de como selecionar os diversos parâmetros e construir o sensor indutivo não foram encontradas na literatura. Deste modo, o desenvolvimento do sensor precisou de algumas iterações e um certo nível de heurística.

O caminho do projeto e construção dos protótipos é detalhado na Figura 10.



Fonte: Autor.

3.2 SENSORES COMERCIAIS

Dois condutímetros foram usados como “juízes”. Suas características encontram-se no Quadro 3. Ambos são vendidos para utilização em sistemas hidropônicos e são capazes de medir condutividade e temperatura.

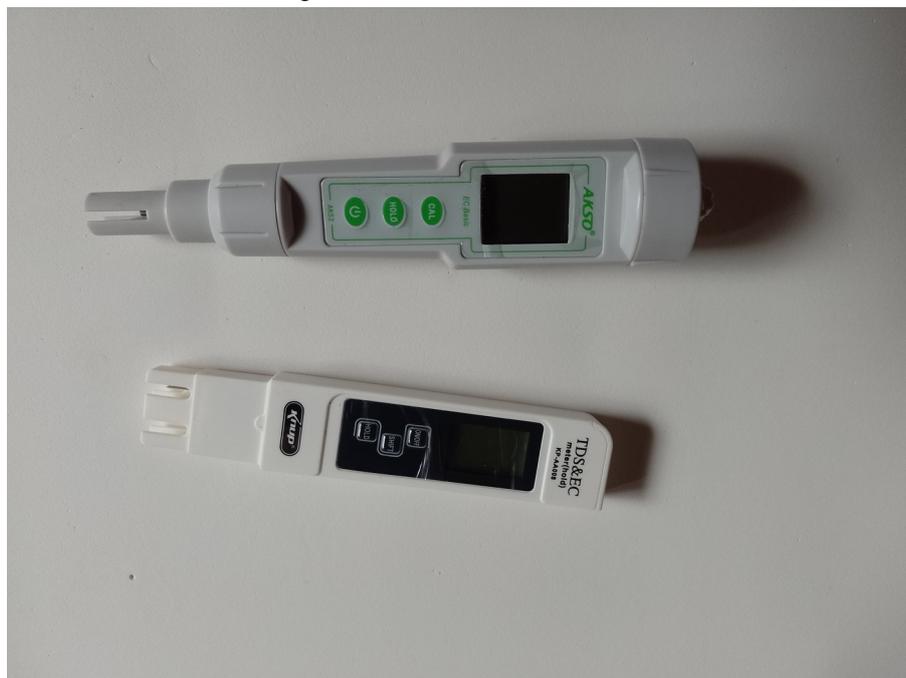
Quadro 3 - Parâmetros dos sensores comerciais

Sensor	Fabricante	Grandeza	Faixa de medição	Resolução	Exatidão
AK 52	AKSO	Temperatura (°C)	0 - 50	0,1	+ - 1,5
		Condutividade (µS/cm)	0 - 3999	1	3 +- 3%
KP – AA008	Knup	Temperatura (°C)	0,1 - 80	0,1	2%
		Condutividade (µS/cm)	0 - 9999	1	2%

Fonte: Autor.

Antes dos testes, os dispositivos foram calibrados usando solução padrão com 1413 µS/cm. Os sensores são mostrados na Figura 11:

Figura 11 - Sensores utilizados.



Fonte: Autor.

Vale destacar que o sensor Knup não apresentou resultados consistentes para condutividades maiores que 4000 µS/cm. Por causa disso, não foram utilizados valores acima deste limite.

Durante os testes com os protótipos, foi constatado que os sensores comerciais apresentaram resultados divergentes, mesmo sendo calibrados com a mesma solução padrão. Por causa disso, novos testes foram realizados utilizando concentração de sal de cozinha como variável independente, tendo em vista que:

- Uma balança de precisão estava disponível;
- A relação entre condutividade e concentração de NaCl (principal componente do sal de cozinha) é conhecida e aproximadamente linear até sua saturação, em torno de 35 g/L.

3.3 SENSOR COM ELETRODOS

A construção do sensor com eletrodos foi inspirada nos trabalhos de Alves (2016) e Carminatia e Fegizb (2017). Carminatia e Fegizb (2017) construíram um dispositivo de baixo custo e alta precisão usando os terminais de ouro provenientes de um conector USB-C e um IC (circuito integrado) analisador de redes, enquanto Alves (2016) construiu dois sensores com placas de aço e utilizou alguns amplificadores, filtros e retificadores para o processamento do sinal.

O protótipo final, na prática, não é um dispositivo capaz de ser usado sozinho, pois depende de geradores de sinal e voltímetros ou osciloscópios para se extrair alguma medida.

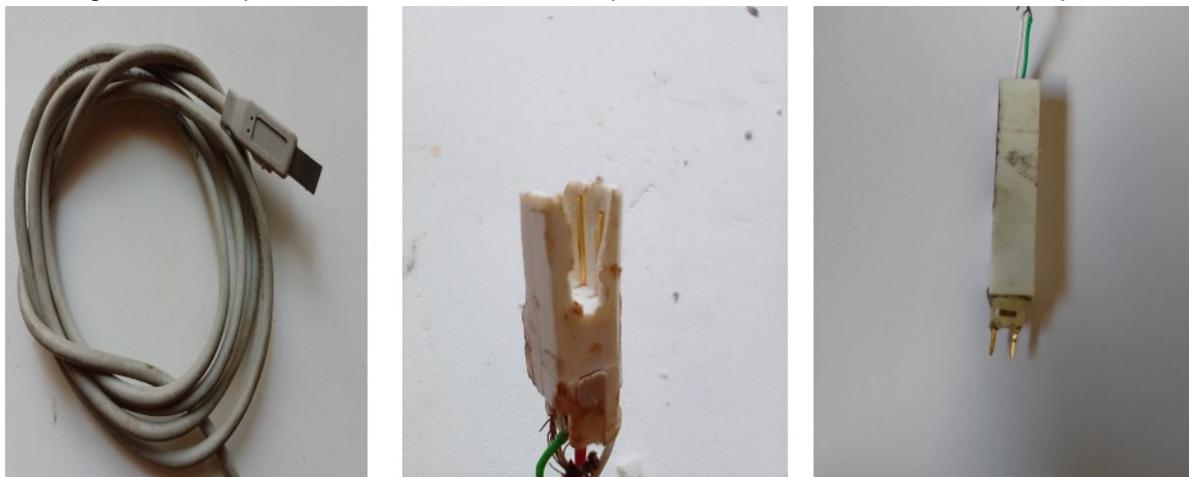
3.3.1 Fabricação dos eletrodos

Os eletrodos utilizados foram feitos a partir de um conector USB - B com contatos cobertos de ouro. Os eletrodos estão espaçados por 3mm, possuem 6 mm de comprimento e são levemente curvos.

3.3.2 Construção do transdutor

Após a extração dos eletrodos, o conjunto foi montado em um molde impresso em Ácido Polilático (PLA) branco e preenchido com resina epóxi (para aplicações eletrônicas). O terminal exposto foi fixado com epóxi transparente à prova d'água. Essas etapas são mostradas na Figura 12.

Figura 12 - Esquerda: USB B. Meio: conector parcialmente desfeito. Direita: sensor pronto.

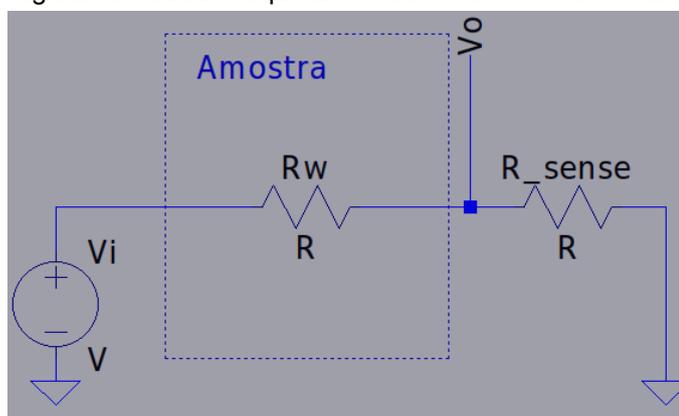


Fonte: Autor.

3.3.3 Testagem e validação

A corrente que flui no líquido é aferida com o auxílio de um resistor conectado entre um dos terminais e a referência, conforme a Figura 13.

Figura 13 - Circuito equivalente do sensor com eletrodos.



Fonte: autor

Se V_o , V_i e R_{sense} são conhecidos então:

$$I = \frac{V_o}{R_{sense}} \quad (8)$$

$$R_w = \frac{V_i - V_o}{I} = \frac{1}{G} \quad (9)$$

$$\sigma = G \cdot K = \frac{K}{R_w} \quad (10)$$

O objetivo dos testes é determinar a coeficiente K que relaciona a condutância medida no líquido com sua condutividade e o coeficiente de temperatura.

3.3.3.1 Determinação da constante da célula

A constante da sonda foi encontrada utilizando os dispositivos comerciais como referência do mesmo modo descrito por Emerson Process Management (2010) e Barron e Ashton ([201-]). Quando os valores de condutividade estavam na escala de ambos os “juízes”, a média era utilizada.

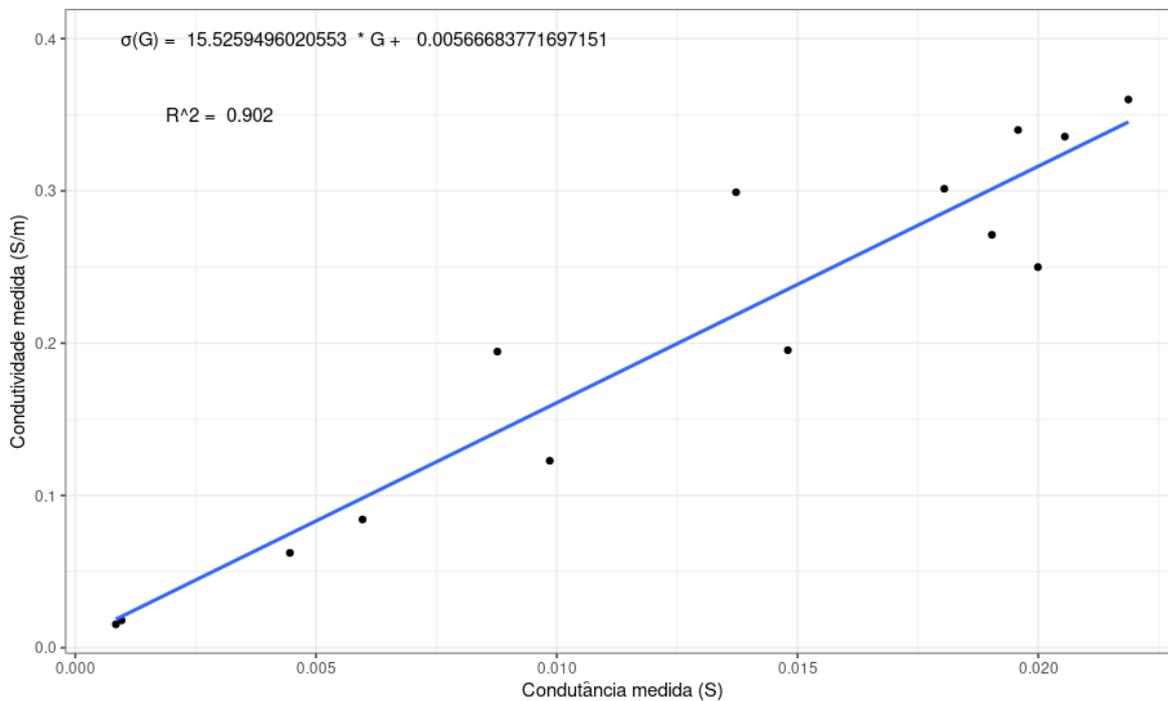
Os experimentos envolveram um *beaker* de 250 ml, água destilada e sal de cozinha. Os sensores foram usados em soluções com progressivamente mais sal, até o limite de 0,9999 S/m do sensor comercial.

A condutância G foi encontrada conforme (9), utilizando medidas feitas por uma ponte RLC⁴ HM8118 da Rohde & Schwarz / Hameg, Figura 17. A curva presente na Figura 14 foi construída, nesta figura o eixo vertical representa a condutividade medida pelos sensores comerciais, enquanto o eixo horizontal representa a condutância calculada. A constante geométrica K, medida em metros⁻¹, foi obtida da inclinação da reta e para esse protótipo, teve o valor de 15,52 m⁻¹.

A Figura 15 mostra a realização desse teste.

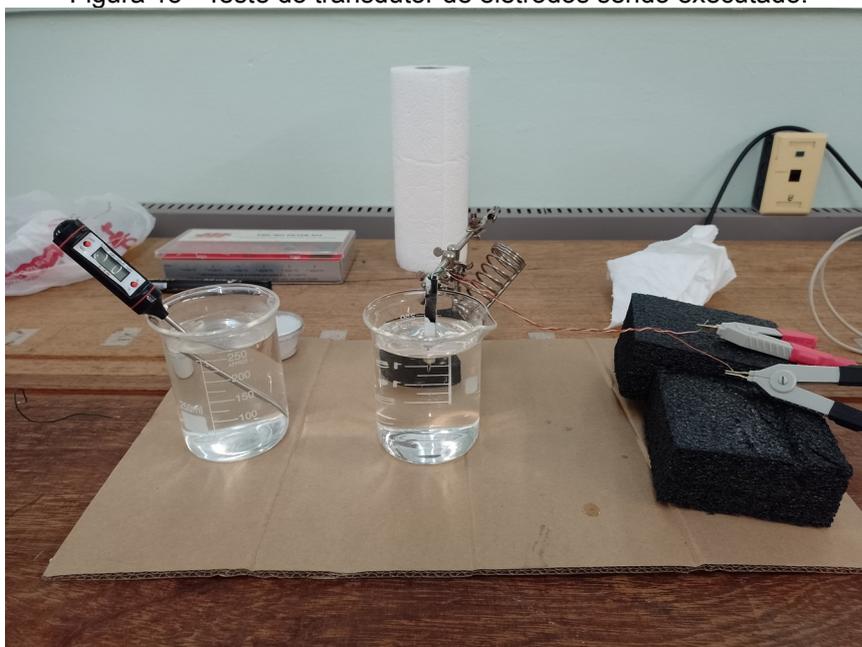
⁴ Uma ponte RLC é um único dispositivo capaz de medir resistências, capacitâncias e indutâncias. Pode variar de dispositivos portáteis e baratos até equipamentos de bancada que permitem medidas mais precisas.

Figura 14 - Teste para determinação do coeficiente geométrico do transdutor de eletrodos. $F = 1 \text{ kHz}$,
 $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: Autor.

Figura 15 - Teste do transdutor de eletrodos sendo executado.



Fonte: Autor.

Os resultados da Figura 14 foram obtidos utilizando inicialmente um resistor em série (10 Ohms) conforme a 13 e depois confirmados utilizando a ponte RLC.

3.3.3.2 Medidas utilizando concentração de sal

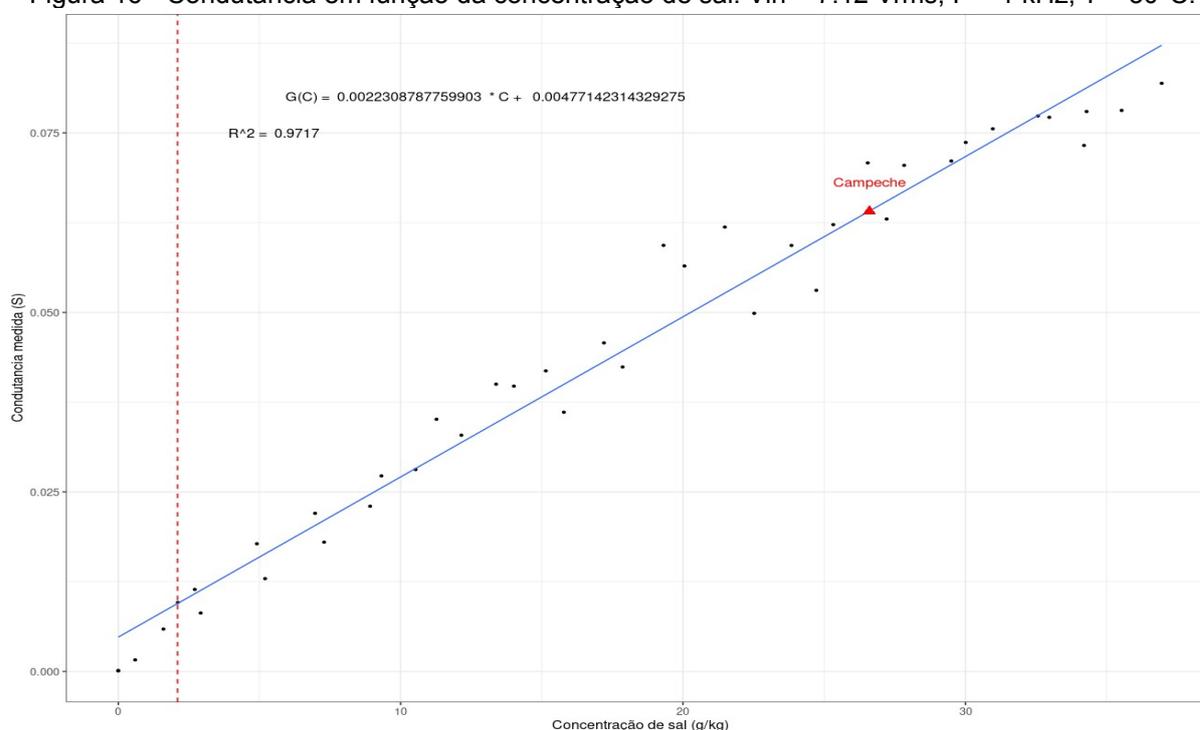
Em seguida, o sensor foi limpo e seco, um recipiente de maior foi preenchido com aproximadamente 1 quilograma de água destilada e medidas foram tomadas em conjunto com o sensor indutivo (na prática o sensor de eletrodos foi retirado durante as medidas do transdutor indutivo, para evitar efeitos de proximidade). A água destilada apresentava condutividade de $6 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Sal de cozinha foi adicionado em passos de aproximadamente 1 g, até a concentração atingir um patamar próximo de 36 g/kg. O processo foi repetido mais uma vez e a curva da Figura 16 foi construída. Nesta imagem, a linha vermelha representa o limite dos sensores comerciais e é possível observar que sua escala não é adequada para medidas feitas com água do mar.

É possível observar que a relação é linear por boa parte de sua extensão, mas começa a ter um perfil de saturação após 35 g/kg. Este fenômeno de leve saturação não é devido ao sensor, mas sim ao fato de que a condutividade molar, a razão entre condutividade e concentração, diminui para concentrações elevadas.

Uma amostra de água da praia do Campeche (Florianópolis - SC) foi coletada no dia 26/02/2022 e sua concentração de sal foi estimada (utilizando o modelo linear) em 26,6 g/kg. Usualmente, o mar apresenta um pouco mais de sal, mas fortes chuvas caíram na região no dia da coleta e podem ter diminuído a concentração de sais.

Figura 16 - Condutância em função da concentração de sal. Vin = 7.12 Vrms, F = 1 kHz, T = 30°C.



Fonte: Autor.

3.3.4 Sobre o coeficiente de temperatura

Assim como em sólidos, a condutividade de líquidos também varia com a temperatura. Por isso, é conveniente expressar as medidas de condutividade corrigidas para 25 °C. Emerson Process Management (2010) apresenta uma correção de primeira ordem, onde a condutividade corrigida, C_{25} , tem a forma:

$$C_{25} = \frac{C_T}{1 + \alpha_{25}(T - 25)} \quad (11)$$

T é a temperatura medida, C_T é a condutividade medida e α_{25} é o coeficiente de temperatura em relação a 25 °C.

Para determinar α , é necessário medir uma mesma amostra em algumas temperaturas distintas. A correção de temperatura auxilia na comparação de resultados e α_{25} , de acordo com ISO (1985), é encontrado conforme (12):

$$\alpha_{25} = \frac{\sigma_T - \sigma_{25}}{\sigma_{25} \cdot (T - 25)} \quad (12)$$

σ_T , σ_{25} e T representam a condutividade na temperatura T , condutividade a 25 °C e temperatura de medição, respectivamente. Todo esse processo é dificultado, pois α_{25} varia com o tipo e concentração de soluto.

Ambos os sensores “juízes” utilizados neste trabalho, de acordo com seus fabricantes, realizam a correção automática da temperatura, mas informações sobre seus métodos e coeficientes não foram encontradas. Essa falta de informação é mais uma fonte possível de erro no processo de análise dos protótipos.

3.4 SENSOR INDUTIVO

Não foram encontradas muitas referências a respeito de como construir esse tipo de sensor (como e por que certos parâmetros foram selecionados e processo de design). A metodologia utilizada para construir o protótipo indutivo foi baseada em Kandur (2021), Sheng (2015) e a descrição de Striggow (1985) também tentou-se evitar os erros de Parra (2011,2015).

3.4.1 Seleção de núcleos

3.4.1.1 Tamanho

O tamanho dos núcleos é um parâmetro importante e sensores comerciais integrados em sistemas CTD têm em torno de 20 - 60 mm de diâmetro (STAR ODDI, 2021) e (AQUALABO, 2021). Como o protótipo ainda não será utilizado no mar, o tamanho deve ser algo prático de ser manuseado em ensaios de bancada.

3.4.1.2 Frequência

É possível observar na Figura 6 que a dependência da frequência aumenta conforme a condutividade diminui. Portanto, frequências maiores devem ser usadas para condutividades menores. Nenhum valor específico de frequência recomendado foi encontrado na literatura, mas nesse trabalho buscou-se núcleos que operassem

(por completo ou parte) no espectro de 20 Hz – 1 MHz, utilizado em transdutores com eletrodo (BEŠTER-ROGA, 2006).

Na prática, buscou-se núcleos que operassem bem de 10 kHz até 1 MHz, por algumas razões:

- Alimentar o sensor com frequências baixas requer correntes maiores, que um gerador de sinais comum não consegue prover, ou instrumentação mais sensível.
- Os amplificadores operacionais disponíveis só operam bem até em torno de 1 MHz.
- A instrumentação para frequências próximas às de áudio é relativamente simples. No entanto, cuidado adicional deve ser tomado para frequências elevadas.

3.4.1.3 Permeabilidade

Possivelmente a permeabilidade seja o parâmetro mais importante pois é o que determina a resposta em frequência, as perdas e a qualidade dos indutores.

Enquanto o conhecimento e discussão sobre permeabilidade e caracterização de materiais magnéticos preenche volumosos livros, neste trabalho limitou-se somente a escolher um núcleo com permeabilidade suficientemente elevada que tivesse custo pequeno e disponibilidade no laboratório.

Mas quão elevado esse parâmetro precisa ser? Striggow e Dankert (1985) mencionam o uso de Mu-Metal (que geralmente tem μ_r na casa de 10^5) e mencionam que: *“It is important to arrange the two transformers in such a manner that the only coupling between them is by the common water loop.”*⁵ (STRIGGOW; DANKERT, 1985, p.176.).

Já Sheng e Hui (2015) avaliaram sensores feitos com dois materiais com μ_r de $1,6 \times 10^5$ e $1,5 \times 10^4$, respectivamente, e chegaram à conclusão que permeabilidades maiores permitem indutâncias maiores e, portanto, resolução melhor. O protótipo feito por Kandur (2021) possui um μ_r em torno de 10^4 , mas essa escolha não foi detalhada.

⁵ “É importante posicionar os transformadores de modo que o único acoplamento entre eles seja pela corrente induzida na água.” (Tradução nossa).

Catálogos de fabricantes tais como Yokogawa ([201-]) somente mencionam “alta permeabilidade”.

Com isso em mente, iniciou-se a busca por pares de núcleos toroidais similares e com μ_r maior que alguns milhares. O processo foi feito da seguinte maneira:

1. O núcleo era registrado com um marcador.
2. O diâmetro interno, externo e altura dos núcleos eram medidos usando um paquímetro.
3. Em torno de 5 a 10 voltas eram feitas no núcleo com fios de cobre. O número de voltas era registrado.
4. A impedância era medida utilizando uma ponte RLC.
5. A medida de impedância era repetida em um *Vector Network Analyzer* (VNA)⁶ (FSV30 da Rohde & Schwarz, Figura 17).
6. O μ_r era calculado utilizando (13).

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2}{2 \cdot \pi} \cdot h \cdot \log_e \left(\frac{r_e}{r_i} \right) \quad (13)$$

Derivação: Apêndice A

μ_0 , μ_r , N , h , r_e e r_i são permeabilidades magnéticas do espaço livre, permeabilidade magnética relativa, número de espiras, altura, raio externo e raio interno, respectivamente.

As medidas foram realizadas em dois equipamentos diferentes, principalmente para comparação de resultados, mas, também, porque a ponte RLC só faz medidas até 200 kHz.

⁶ VNA é um equipamento capaz de medir propriedades de redes com uma ou duas portas. No caso específico de VNAs tanto informações de magnitude quanto de fase são medidas. Usualmente os resultados são apresentados utilizando parâmetros S, mas a conversão para impedâncias ou admitâncias é direta e somente uma questão de cálculo.

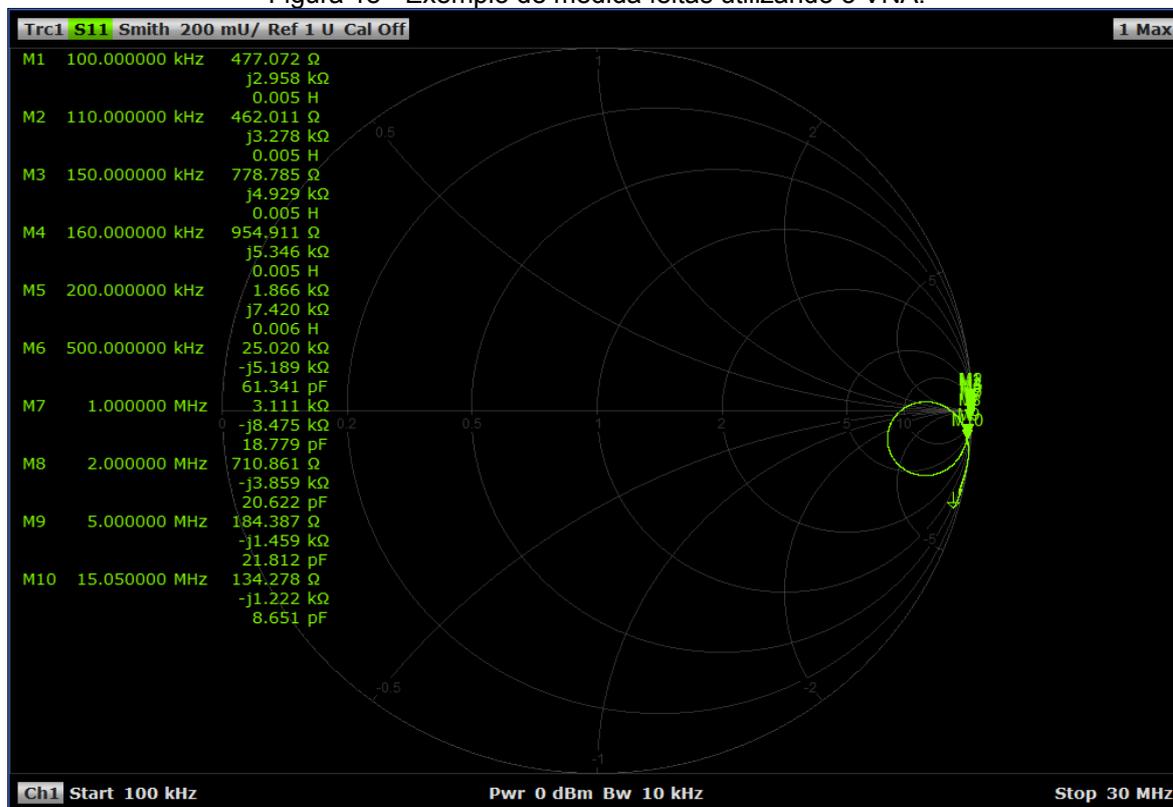
Figura 17 - Esquerda: Vector Network Analyzer. Direita: Ponte RLC.



Fonte: MagLab (2022)

A Figura 18 mostra o resultado de um teste feito utilizando o VNA. Esse tipo de gráfico é conhecido como Gráfico de Smith de impedância. Por meio dele, é possível ver o comportamento de um elemento ou linha de transmissão. No caso específico da Figura 18 é possível ver que após 200 kHz, o indutor analisado se comporta como um capacitor.

Figura 18 - Exemplo de medida feitas utilizando o VNA.



Fonte: Autor.

A Figura 19 mostra uma medida feita na ponte RLC. Utilizando os dados resultantes, foi possível validar os parâmetros de um protótipo já construído (Figura 23).

Figura 19 - Utilização da ponte RLC para medir parâmetros do protótipo



Fonte: Autor.

3.4.1.4 Resultados

Vários núcleos foram examinados e dois núcleos provenientes de indutores EPCOS foram selecionados.

Originalmente, eles foram projetados como *power line chokes* (supressores de modo comum), por isso as bobinas duplas. Apesar de, em seu estado original, apresentarem indutância suficiente para serem utilizados nos protótipos, eles estavam em um invólucro plástico e cobertos por epóxi. Desta forma, tiveram de ser desmontados e enrolados novamente para sua caracterização.

As características desses indutores estão no Quadro 4. As medidas dimensionais foram medidas após a desconstrução do indutor.

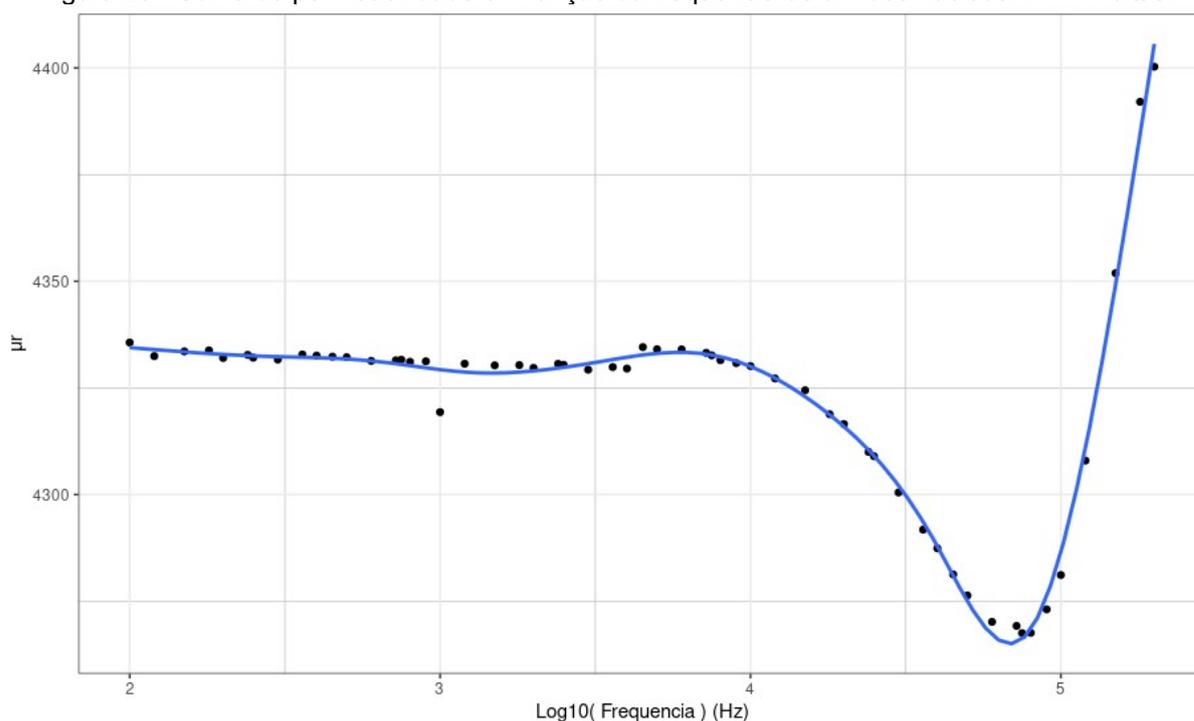
Quadro 4 - Parâmetros do indutor selecionado.

Modelo	Quantidade (un)	Diâmetro Externo (mm)	Diâmetro Interno (mm)	Altura (mm)	Indutância nominal (mH)	Material base
B82723-J2202-21	2	24,2	13,1	10.8	2 x 5,6 (+- 30%)	CuNi18Zn20

Fonte: TDK GROUP (2016)

A permeabilidade relativa do núcleo foi estimada em torno de 4300 – 5000. A Figura 20 mostra o a curva de permeabilidade em função da frequência de um dos núcleos selecionados. Pode-se ver que a permeabilidade é constante até em torno de 20 kHz e aumenta após 100 kHz, isso vai de encontro com o catalogo do fabricante.

Figura 20 - Curva de permeabilidade em função da frequência de um dos núcleos. N = 4 voltas.



Fonte: Autor.

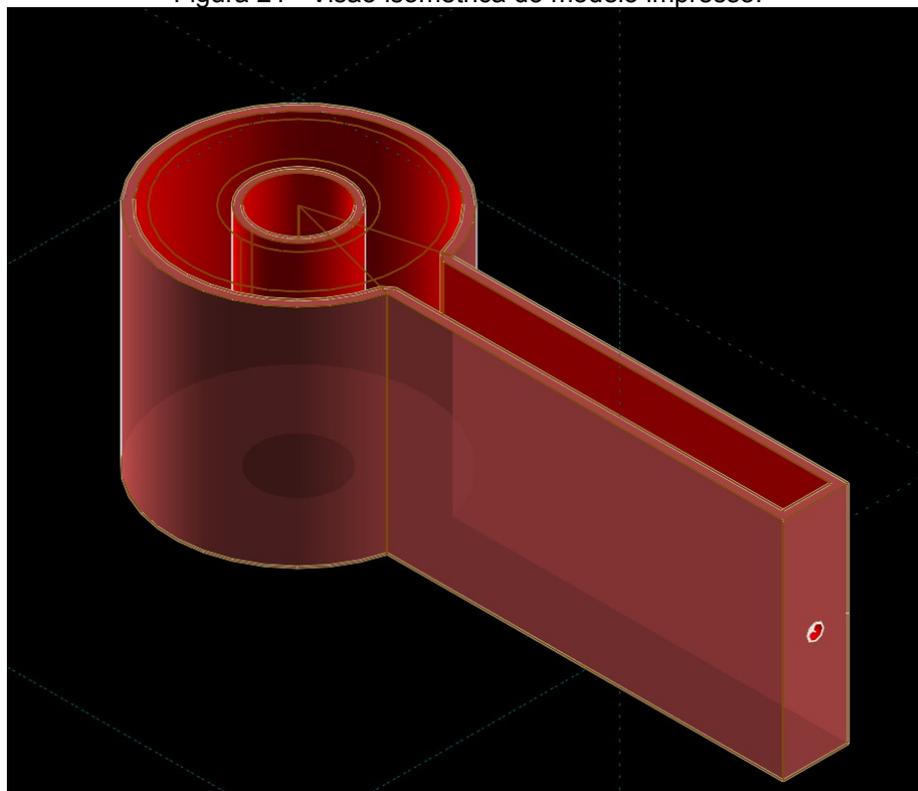
Alguns núcleos com performance ruim e procedência desconhecida, mas de tamanho similar, foram separados para testar o processo de fabricação dos moldes antes de usar os núcleos selecionados.

3.4.2 Construção do invólucro

Sondas comerciais como a da Figura 4 são construídas de termoplástico resistente, não condutivo e não magnético. Usualmente, possuem perfil arredondado e são conectadas por cabos que ficam livres ou rosqueadas em um suporte metálico. Neste trabalho, por ser apenas um protótipo, o invólucro foi feito com PLA branco e preenchido com resina epóxi utilizada para preenchimento de transformadores e circuitos elétricos (RETAPOL, 2022).

O projeto do molde foi feito utilizando o *software* de CAD paramétrico SolveSpace e impresso numa impressora FDM⁷. Ele foi projetado para ser preenchido em apenas um derramamento de epóxi e de modo que todos os condutores e partes do núcleo ficassem cobertas de pelo menos 1,5 mm de resina, com exceção de quatro pequenos espaçadores no fundo. As Figuras 21 e 22 mostram o modelo 3D e os resultados obtidos no final do processo.

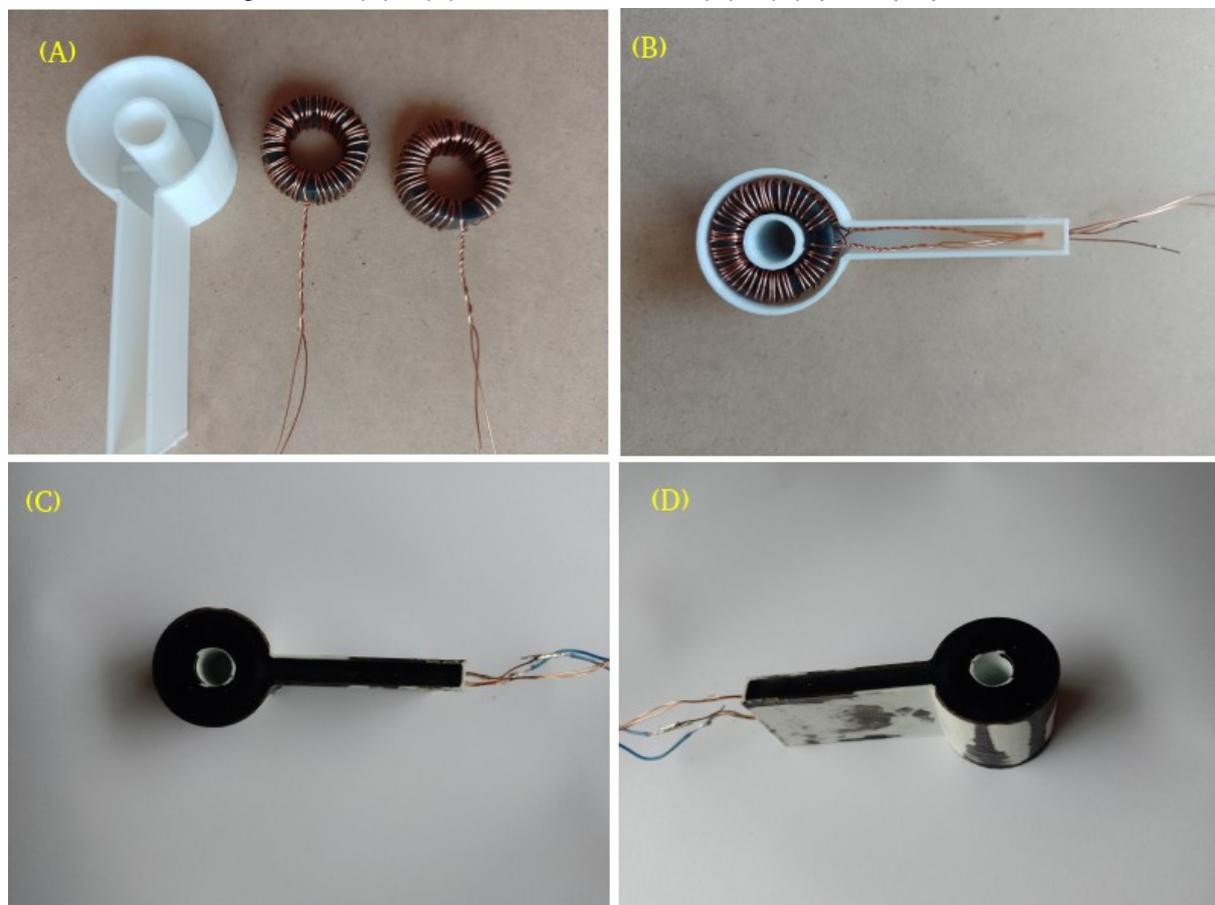
Figura 21 - Visão isométrica do modelo impresso.



Fonte: Autor.

⁷ Filament Deposition Modeling é um processo de fabricação onde um filamento de polímetro e aquecido, extrudado e depositado em camadas para criar um modelo.

Figura 22 - (A) e (B): indutores e molde. (C) e (D): protótipo pronto.



Fonte: Autor.

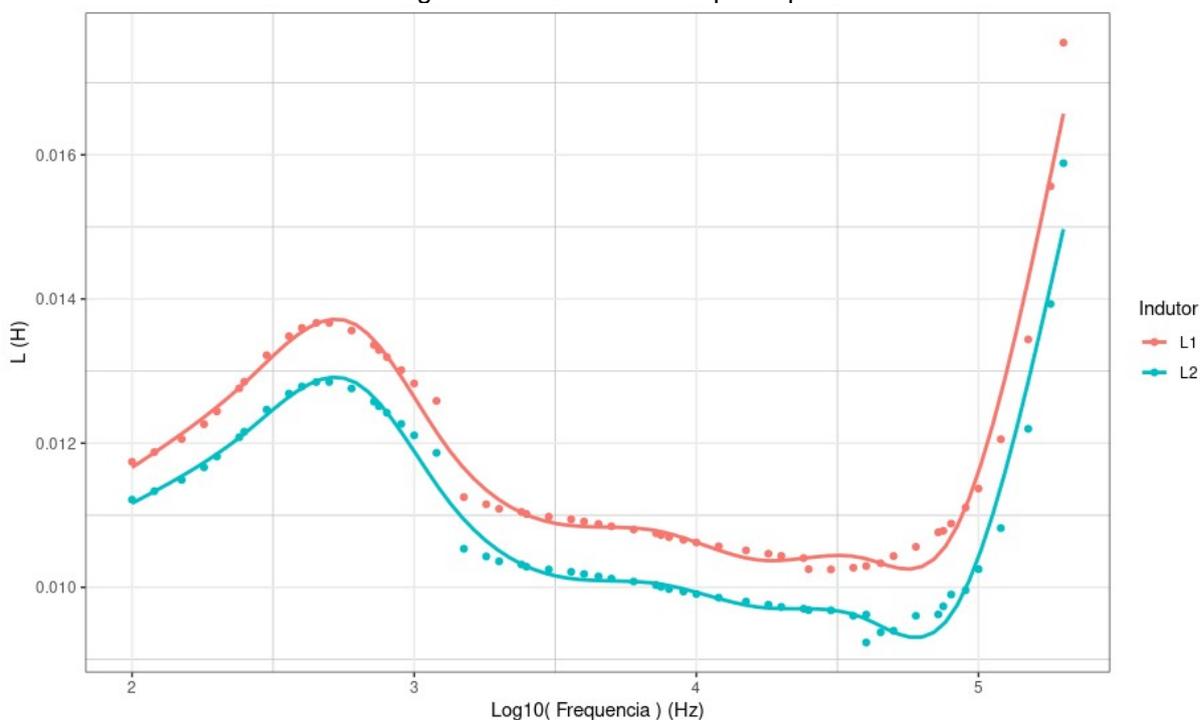
Levando em consideração a Figura 6 e o Quadro 4, o protótipo foi projetado para ter uma indutância próxima do indutor original, em torno de 12 mH, o que implicou em uma bobina de 50 voltas.

3.4.3 Testagem e validação

3.4.3.1 Medição dos parâmetros do circuito

O sensor, já moldado e curado, foi novamente avaliado utilizando o analisador de impedância. A variação das indutâncias em relação a frequência é representada na Figura 23.

Figura 23 - Indutâncias do protótipo.



Fonte: Autor.

Nesse estágio, percebeu-se que um dos indutores tinha uma espira a menos do que o planejado (a curva azul da Figura 23), mas isso não interferiu muito no resultado final.

3.4.3.2 Teste dielétrico e de resistência à água

Após concluído o processo de cura da resina, o primeiro teste realizado foi o teste do dielétrico e da resistência à água. Para isso, cada sensor foi colocado em um *beaker* com água do mar, os terminais de cada indutor foram curto-circuitados e, em seguida, uma tensão DC de 30 V foi aplicada entre os indutores por quinze minutos. O transdutor então passava a noite sob água e a tensão era reaplicada pelo mesmo tempo. Caso corrente fluísse entre os indutores ou fosse detectada a presença de bolhas, o protótipo era descartado.

O primeiro protótipo, feito com um núcleo reserva de baixa qualidade, foi reprovado na primeira etapa. Uma análise destrutiva constatou que a mistura de resina estava errada e não curou corretamente, permitindo a entrada de água e a

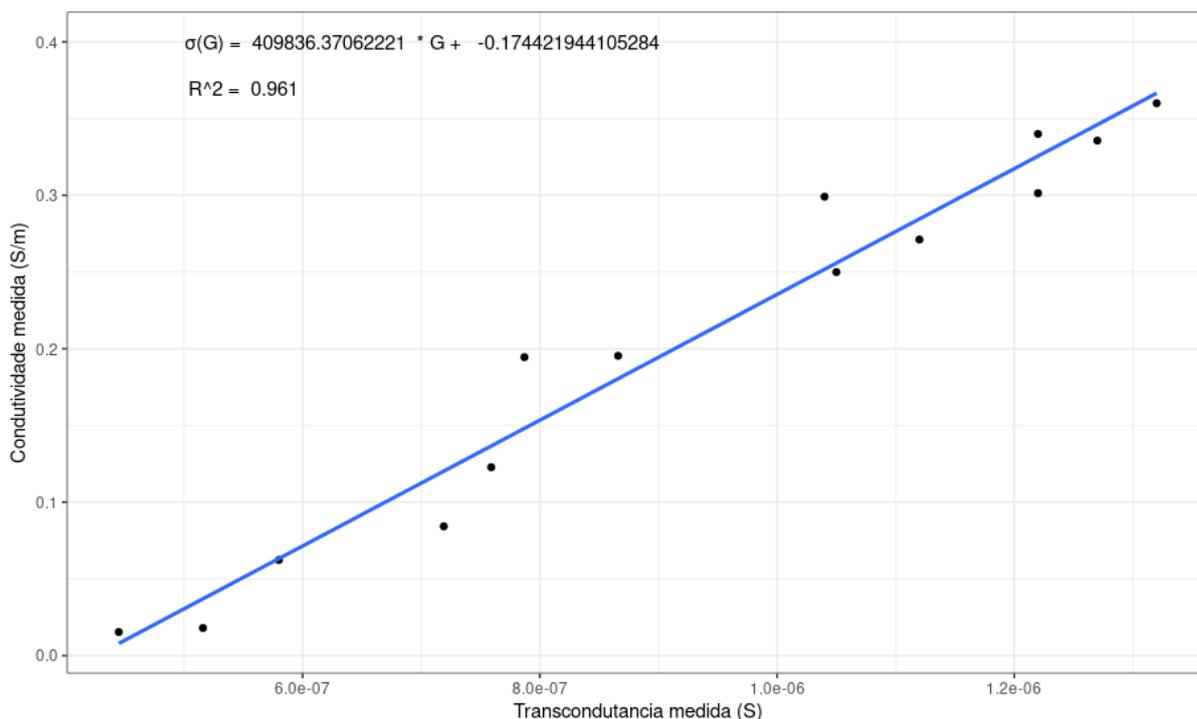
formação de bolhas. O outro protótipo, feito com os núcleos do Quadro 4 foi aprovado.

3.4.3.3 Determinação da constante da célula

Foi feito de um jeito similar ao descrito em 3.3.3.1, mas em um recipiente plástico de um litro, com diâmetro e altura suficientes para o sensor ficar em torno de 2 cm de qualquer parede e completamente submerso. Os resultados encontram-se na Figura 24 e mostram que o sensor comercial tem o comportamento linear esperado.

Conforme mencionado em 3.3.3.1, os sensores comerciais utilizados tiveram um desempenho não ideal. Por causa disso, testes adicionais foram realizados utilizando a concentração de sal de cozinha como variável independente.

Figura 24 - Curva da condutividade em função da transcondutância. $F = 20 \text{ kHz}$, $R_a = 1 \text{ k}\Omega$, $T = 25^\circ\text{C}$, $V_{in} = 7.1 \text{ V}_{rms}$.



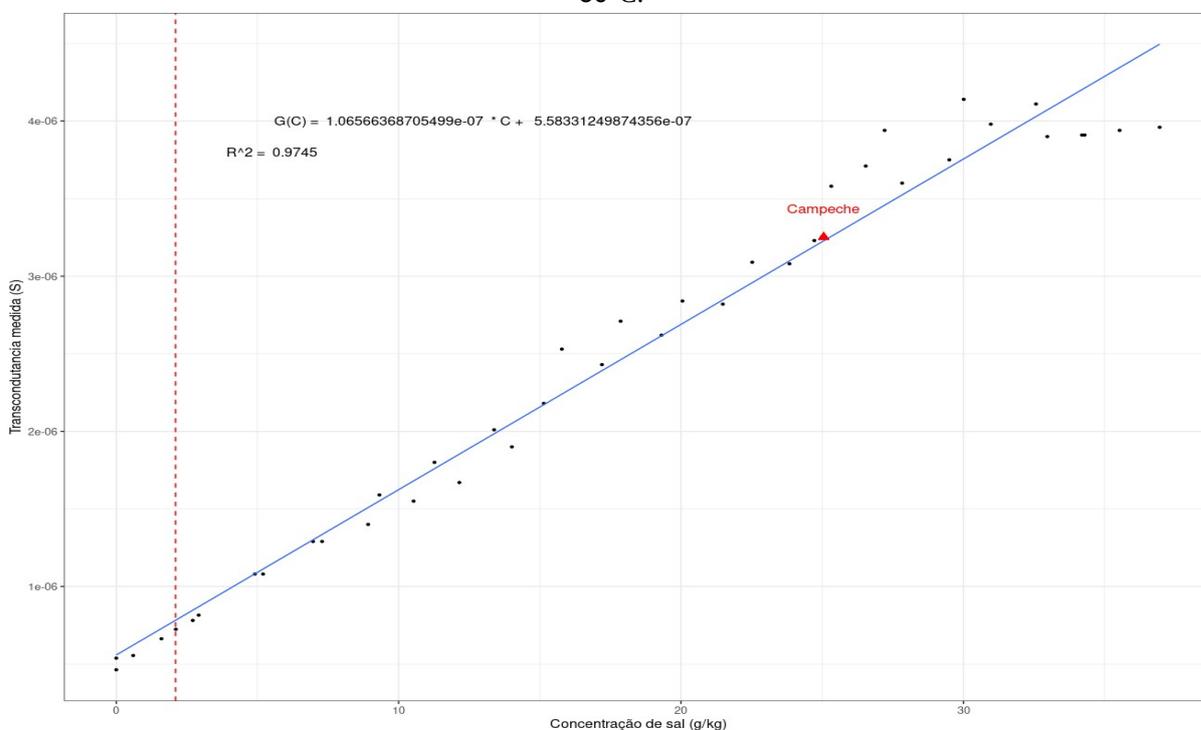
Fonte: Autor.

O valor da constante de célula foi determinado por meio de regressão linear e está em torno de $4.09 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$.

3.4.3.4 Testes utilizando concentração de sal

Em seguida, o processo descrito em 3.3.3.2 foi realizado com o sensor indutivo e a Figura 25 foi construída. Assim como o sensor de eletrodos, a relação é aproximadamente linear até em torno de 35 g/kg. Com este sensor, estimou-se que a mesma amostra de água do mar tinha uma concentração de 25,05 g/kg. Do mesmo modo da Figura 16, a linha vermelha indica o limite dos sensores comerciais.

Figura 25 - Transcondutância em função da concentração de sal. $V_{in} = 7.12 V_{rms}$, $F = 20 \text{ kHz}$, $T = 30^\circ\text{C}$.



Fonte: Autor.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram construídos dois protótipos funcionais de condutímetros baseados em dois princípios de funcionamento distintos. Foi possível medir a condutividade de várias amostras, incluindo água do mar coletada pelo autor. Nas Figuras 14, 16, 24 e 25 a relação linear entre condutividade e concentração de sal e a saída dos sensores foi demonstrada, o que era o o esperado para esse tipo de transdutor e os modelos descritos em (6).

A criação de modelos lineares para o funcionamento dos sensores é importante, mas entender as limitações e erros relacionados a criação desse modelo é tão importante quanto. O presente trabalho visa provar o conceito de que se pode fazer esse tipo de transdutor com materiais simples. Não pode ser considerado, sob nenhuma ótica, um ensaio metrológico preciso. Isto se deve por algumas razões:

1. O laboratório onde a maioria das medidas foi realizada, o MagLab, possui uma equipe extremamente qualificada e equipamentos de qualidade. No entanto, a maior parte disso é voltado para medidas elétricas. Estão ausentes equipamentos de química básicos, tais como, balanças analíticas, vidraria volumétrica, reagentes e, mais importante para este estudo, medidores de salinidade/condutividade. Isso, de nenhum modo, é uma falta do laboratório, pois a área de atuação dele é a de eletromagnetismo e compatibilidade e não a de eletroquímica.
2. Existem na UFSC laboratórios com salinômetros/condutímetros de bancada (no Departamento de Biologia e Oceanografia, por exemplo). Mas a dinâmica e as limitações impostas pela pandemia de COVID-19 tornaram a cooperação com outros laboratórios complicada. A dinâmica do transporte de equipamentos e/ou amostras, caso fossem realizadas por terceiros, também seria problemática.
3. Os medidores de condutividade utilizados como “juízes”, não são adequados para calibrar nenhum equipamento. Foi frequente a situação onde ambos os medidores apresentavam grandes divergências sobre a solução padrão de calibração.
4. A correção de temperatura dos sensores “juízes” não é clara. Isso é mais uma fonte de incertezas no sistema.

5. As medidas foram feitas sem controle de temperatura e o processo de mistura e manipulação frequentemente muda a temperatura da solução. Sensores desse tipo são calibrados em banhos de temperatura controlada. Tentou-se fazer as medidas e manipulações de modo rápido, para que a temperatura não flutuasse tanto, mas, mesmo assim, algumas medidas têm variações de 0.5 – 1 °C de variação. As Figuras 16 e 25, em suas faixas mais lineares, mostram quase que duas retas com inclinações levemente diferentes. Isso se deve a uma mudança de em torno de 0.5 °C entre as repetições do experimento.
6. O processo que resultou nas Figuras 16 e 25 serviu só para mostrar a linearidade do sensor, não é um processo de calibração (apesar de g/kg ou ‰ ser uma unidade quase que idêntica a escala prática de salinidade). Além do mais, o sal utilizado é hidrofílico e continha certa quantidade de água.
7. O plástico utilizado na camada externa do molde (PLA) também é hidrofílico, além de ser rugoso. Então, mesmo após ser limpo com água destilada ou seco, pequenas quantidades de sal e água ainda ficavam presentes. PLA é também biodegradável, o que não é próprio para algo sob exposição constante de longo prazo.
8. O projeto dos circuitos que emitissem e processassem o sinal não foi incluído no escopo deste trabalho. Somente as sondas de contato ou indutivas foram consideradas. O equipamento teria de ter seu comportamento avaliado em sua totalidade.
9. O sensor indutivo pode muito bem ser utilizado somente com uma terminação resistiva, como foi feito aqui, mas seu comportamento seria melhor avaliado se sua saída fosse operada em curto-circuito e sua corrente fosse medida. Infelizmente, nem nos estoques do próprio Autor ou do MagLab, algum *IC* de *current sensing* ou amplificador de instrumentação se encontrava acessível. Seria inteiramente possível utilizar AmpOps comuns e componentes discretos nesta configuração, mas os erros e problemas se acumulariam. A prioridade foi tentar medidas com equipamentos precisos e calibrados tais como o analisador de impedância, VNA e osciloscópios.

Apesar disso, os sensores se comportaram bem em relação à salinidade (Figuras 16 e 25). Resta somente uma referência precisa e confiável para transformar essas medidas em uma escala absoluta e também confiável.

Para futuros trabalhos sugere-se corrigir os problemas no processo de calibração e desenvolver um sistema completo que possa ser utilizado na prática.

Os trabalhos recentes de Harms (2021) e Li (2016) também mostram que sensores que utilizam correntes de Foucault ainda não foram muito explorados para aplicações em líquidos mesmo usando núcleos mais simples (ou nenhum) e sendo menores.

5 REFERÊNCIAS

- ALVES, Leonardo Sehn. **Desenvolvimento de Medidor de Condutividade Elétrica da Água para fins de Monitoramento Ambiental**. Orientador: Rafael Peretti Pezzi. 2016. TCC (Bacharelado em Engenharia Física) - (UFRGS), [S. l.], 2016.
- AQUALABO. **AQUALABO catalog 2021**. [S. l.: s. n.], 2021.
- BOWLER, J. R. Eddy-current interaction with an ideal crack: The forward problem. **Journal of Applied Physics**, [S. l.], p. 128? 8137, 1 jan. 1994.
- CARMINATIA, Marco; FEGIZB, Paolo Luzzatto. Conduino: Affordable and high-resolution multichannel water conductivity sensor using micro USB connectors. **Sensors and Actuators B: Chemical**, [S. l.], p. 1034-1041, 1 nov. 2017.
- CONNELLY, Andy. **Conductivity of a solution**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://andyconnelly.wordpress.com/2017/07/14/conductivity-of-a-solution/>. Acesso em: 6 fev. 2022.
- HARMS, Julius; KERN, Thorsten A. Theory and Modeling of Eddy Current Type Inductive Conductivity Sensors. **Engineering Proceedings**, [s. l.], v. 6, p. 1-1, 17 maio 2021.
- KANDUR, Yi githan. Uncertainty Analysis for Low-Cost Transformer-Type Inductive Conductivity Sensors. **Engineering Proceedings**, [s. l.], v. 6, ed. 52, 17 maio 2021.
- LI, Weichen; CHIANG, Yuying. A novel method for inspecting raw milk quality by using dual-coil inductance. **2016 IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)**, Shanghai, 2016.
- MEGGER GROUP (United States). Megger Valley Forge. **Guide to Clamp-on Testing**. [S. l.: s. n.], 2013.
- MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) (Brasil). CONAMA. **RESOLUÇÃO, 357, 7 DE MARÇO DE 2005**. [S. l.], 17 mar. 2005.
- MORCOS, Selim. Measuring salinity: ICES link to the scientific community and developing world. *In*: 100 YEARS OF SCIENCE UNDER ICES, 2000, Helsinki. **Paper [...]**. [S. l.: s. n.], 2002.
- NATION OF OUR HOBBIES. **How much salt in seawater?:** Precipitation titration. [S. l.], 18 fev. 2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=fw1Ved-bfal>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- OHM, G. S. **The galvanic circuit investigated mathematically**. LOCKWOOD, Thomas D. (ed.). Tradução: William Francis. Berlin: D. Van Nostrad Company, 1827.
- PARRA, LORENA; SENDRA, SANDRA. Water Conductivity Measurements based on Electromagnetic fields. **Recent Advances in Intelligent Control, Modelling and Computational Science**, [s. l.], p. 1-6, 1 jan. 2011.
- PARRA, Lorena; SENDRA, Sandra. Development of a Conductivity Sensor for Monitoring Groundwater Resources to Optimize Water Management in Smart City Environments. **Sensors**, [s. l.], p. 20991-21015, 13 maio 2015.
- RETAPOL (São Paulo). **Loja RETAPOL**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.lojaretapol.com.br/resinas/resina-isolante-epoxi-para-circuitos-mufas-condensadores->. Acesso em: 1 fev. 2022.
- RIBEIRO, A. Lopes; RAMOS, Helena M. Geirinhas. INDUCTIVE CONDUCTIVITY CELL FOR WATER SALINITY MONITORING. **Metrology for a Sustainable Development**, Rio de Janeiro, p. 1, 17 set. 2006.
- ROACH, Steven D. **Designing and Building an Eddy Current Position Sensor**. [S. l.], 1 set. 1998. Disponível em: <https://www.fierceelectronics.com/components/designing-and-building-eddy-current-position-sensor>. Acesso em: 1 fev. 2022.

SHENG, Wu; HUI, Lan. Investigation of the Performance of an Inductive Seawater Conductivity Sensor. **Sensors & Transducers**, [s. l.], p. 43-48, 31 mar. 2015.

SHKVORETS, Igor. Implementation of the electrical conductivity of seawater. *In: Salinometry*. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://salinometry.com/implementation-of-the-electrical-conductivity-of-seawater/>. Acesso em: 2 fev. 2022.

STAR-ODDI (Iceland). **Mini CTD salinity sensor for connection to embedded systems**. [S. l.], 1 fev. 2022. Disponível em: <https://www.star-oddi.com/products/submersible-water-sensors/conductivity-salinity-sensor>. Acesso em: 5 fev. 2022.

STRIGGOW, K.; DANKERT, R. Induktive Leitfähigkeitsmessung für die ozeanologische Anwendung-Physiologische Wirkprinzipien, thematische Grundlagen und die Möglichkeiten zur Eliminierung des Einflusses einer variablen Kempermeabilität. **Beitr. zur Meereskunde**, [s. l.], v. 50, p. 25-41, 1 jan. 1984.

STRIGGOW, Klaus; DANKERT, Reinhart. The Exact Theory of Inductive Conductivity Sensors for Oceanographic Application. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, [S. l.], p. 175-179, 1 abr. 1985.

TDK GROUP (Alemanha). EPCOS AG. **Chokes for Power Lines: Current-compensated ring core double chokes B82723A/J**. [S. l.]: EPCOS, 2016. 7 p. Disponível em: https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/emc/emc/line-filter/data_sheet/30/db/ind_2008/b82723a_j.pdf. Acesso em: 4 mar. 2022.

TWI (UK). **Eddy Current Testing**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/eddy-current-testing-123>. Acesso em: 1 fev. 2022.

UFSC (Florianópolis). MagLab. **Maglab: Estrutura**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://maglab.ufsc.br/estrutura/>. Acesso em: 2 mar. 2022.

UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR (USA). USGS. What is saline water?. *In: Saline Water Use in the United States*. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/saline-water-use-united-states>. Acesso em: 10 fev. 2022.

WAKAMASU, H. **A Dielectric Spectrometer for Liquid Using the Electromagnetic Induction Method**. [S. l.]: Hewlett-Packard Journal, 1997.

YOKOGAWA (Japão). **General Specifications: Model ISC40G (S) Inductive Conductivity sensor and fittings**. 21. ed. Netherlands: [s. n.], [201-]. 12 p.

APÊNDICE A

O campo magnético B , em um núcleo toroidal de permeabilidade μ , envolvido por uma espira de N voltas, percorrida por uma corrente I , pode ser calculado com o auxílio da Lei de Ampere e tem a forma mostrada em (14).

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (14)$$

Se o núcleo tem R_i e R_e como raios internos e externos, e μ muito maior que μ_0 então o fluxo magnético se confina somente dentro do núcleo e:

$$R_i < r < R_e \quad (15)$$

Se o toroide tem uma altura H (e nenhum chanfro ou *bevel*), o fluxo ϕ em uma seção transversal no torus é:

$$\phi = \int_{R_i}^{R_e} \vec{B} \cdot \hat{n} dA \quad (16)$$

\hat{n} é um vetor unitário perpendicular a seção transversal. Como B e N são sempre perpendiculares a integral se simplifica para:

$$\phi = \int_{R_i}^{R_e} |B| \cdot H dr = \int_{R_i}^{R_e} \frac{\mu \cdot N \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot H dr = \frac{\mu \cdot N \cdot I \cdot H}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right) \quad (17)$$

A indutância definida a partir de ϕ é então:

$$L = \frac{N \cdot \phi(I)}{I} = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot H}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right) \quad (18)$$

É possível “considerar” que o fluxo se distribua de modo igual no núcleo. Isso leva a uma expressão aproximada da forma:

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{2 \cdot \pi \cdot R_{med}} \quad (19)$$

A é a área da seção transversal e R_{med} é a média dos raios.

Para a maioria dos casos, essas equações produzem resultados bem parecidos, mas a (18) é a “correta”, já que B tende a se concentrar no raio interno do toroide.